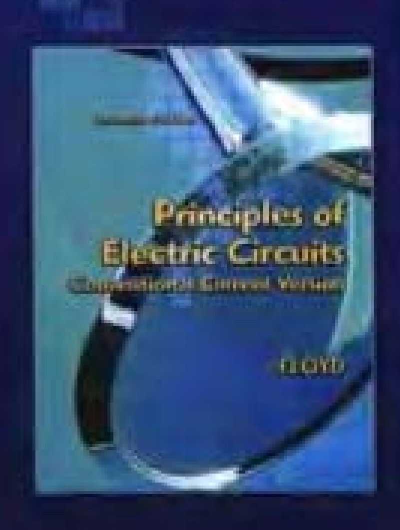
国外电子与通信教材系列



电路原理

（第七版）

Principles of Electric Circuits
Conventional Current Version
Seventh Edition



［美］Thomas L. Floyd 著
罗伟雄 等译



電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
http://www.phei.com.cn

电路原理（第七版）

Principles of Electric Circuits

Conventional Current Version, Seventh Edition

在《电路原理》的最新版本中，全面涵盖了关于电子元件和电路最新内容的简明介绍，重点强调了分析、应用和故障检修。作者 Floyd 的写作风格独具魅力，清晰流畅。在书中，他对基础概念进行了创造性的描述，并加以适当补充，使读者能够牢固掌握电路的各项关键要素。本书颇为畅销，广受赞誉，是一本理想的电子学教科书和相关领域人员的参考书。

本版新特点与改进内容

- 关于故障检修的大量新增内容，包括每章中的故障检修测验
- 扩展了工程标注方面的内容
- 添加了“安全提示”
- 针对故障检修和分析问题，本书附带的 CD-ROM 中包含 EWB v5 电路仿真环境和 Multisim 仿真电路




ISBN 7-121-01799-7
9 787121 017995 >





责任编辑：史　平
责任美编：毛惠庚

ISBN 7-121-01799-7　定价：78.00 元（附光盘 1 张）

国外电子与通信教材系列

电路原理

（第七版）

Principles of Electric Circuits

Conventional Current Version

Seventh Edition

［美］ Thomas L. Floyd 著

罗伟雄 等译

電子工業出版社

Publishiug House of Electronics Iudustry

北京 · BEIJING

内容简介

本书涵盖了有关电元件和电路完整而简明的基础知识，重点强调了分析、应用和技术实践。内容主要包括基本元件、电量和直流电阻电路、交流动态电路三部分。本书内容丰富、概念清晰、通俗易懂。每章都包含大量思考题、习题和自测题等，并提供答案，十分有利于自学。书中注重理论联系实际，技术实践部分为读者提供很大帮助。此外，贯穿全书的电路仿真，可通过本书提供的Multisim软件实现。

本书可作为电子、通信、自动控制、信息工程等本科专业电路原理基础课程教材，对于从事电子技术的人员，则是一本优秀的参考书。

版权贸易合同登记号 图字：01-2003-0355

图书在版编目（CIP）数据

电路原理（第七版）/（美）弗洛伊德（Floyd, T. L.）著；罗伟雄等译. －北京：电子工业出版社，2005.10
（国外电子与通信教材系列）

书名原文：Principles of Electric Circuits: Conventional Current, Seventh Edition

ISBN 7-121-01799-7

Ⅰ.电… Ⅱ.①弗… ②罗… Ⅲ.电路理论－教材 Ⅳ.TM13

中国版本图书馆CIP数据核字（2005）第112971号

责任编辑：史 平

印　　刷：北京市天竺颖华印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱　邮编：100036

经　　销：各地新华书店

开　　本：787×1092　1/16　印张：49.75　字数：1274千字

印　　次：2005年10月第1次印刷

定　　价：78.00元（附光盘1张）

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换；若书店售缺，请与本社发行部联系。联系电话：（010）68279077。质量投诉请发邮件至zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

序

2001年7月间，电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师，商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同，大家认为，这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材，意味着开设了一门好的课程，甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书，对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用，就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代，在原教委教材编审委员会的领导下，汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家，编写、出版了一大批教材；很多院校还根据学校的特点和需要，陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来，随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步，有的教材内容已比较陈旧、落后，难以适应教学的要求，特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天，如何适应这种情况，更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题，除了依靠高校的老师和专家撰写新的符合要求的教科书外，引进和出版一些国外优秀电子与通信教材，尤其是有选择地引进一批英文原版教材，是会有好处的。

一年多来，电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组，选派了富有经验的业务骨干负责有关工作，收集了230余种通信教材和参考书的详细资料，调来了100余种原版教材样书，依靠由20余位专家组成的出版委员会，从中精选了40多种，内容丰富，覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面，既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书，也可作为有关专业人员的参考材料。此外，这批教材，有的翻译为中文，还有部分教材直接影印出版，以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里，我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度，充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步，对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想，无论如何，要做好引进国外教材的工作，一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同，既要注意科学性、学术性，也要重视可读性，要深入浅出，便于读者自学；引进的教材要适应高校教学改革的需要，针对目前一些教材内容较为陈旧的问题，有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书；要与国内出版的教材相配套，安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求，希望它们能放在学生们的课桌上，发挥一定的作用。

最后，预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功，为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题，提出意见和建议，以便再版时更正。

吴佑寿
中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出 版 说 明

进入21世纪以来，我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度，并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是，与世界上其他信息产业发达的国家相比，我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天，我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社，我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向，始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间，我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材，形成了一套“国外计算机科学教材系列”，在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评，得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材，尤其是有选择地引进一批英文原版教材，将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才，也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见，我们决定引进“国外电子与通信教材系列”，并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商，其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等，其中既有本科专业课程教材，也有研究生课程教材，以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求，广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起，陆续推出一些教材的教学支持资料，为授课教师提供帮助。

此外，“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助，其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核，并得到教育部高等教育司的批准，纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作，我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望，具有丰富的教学经验，他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外，对于编辑的选择，我们达到了专业对口；对于从英文原书中发现的错误，我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式，逐一进行了修订；同时，我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后，我们将进一步加强同各高校教师的密切关系，努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书，为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足，在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方，恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

译 者 序

本书是在美国大学应用较广的教科书，已出到第七版，是作者在长期教学实践中经过千锤百炼的优秀教材。本书的最大特点是通俗易懂，十分适合学生自学。书中内容与工程实际紧密结合，从实践中提出问题、解决问题，从而使理论学习不再枯燥无味，对提高学生的学习兴趣十分有利。这些都是国内教材比较缺乏的，也是国内外教材的差距所在。因此，我们将本教材介绍给大家，以利于与国外的教材接轨。

本书有如下特点：

① 从第3章开始每章均有技术实践测验，用于测试学生对电路现象的掌握情况。这些现象是由电路某一参数的变化或错误所引起的。另外，每章中均有技术实践部分，介绍了一种APM(分析、计划和测量)系统方法，可加强学生的实际动手能力。

② 十分适合学生自学，每章都包含大量例题和习题。在章末给出答案，已及本章内容总结。

③ 充分利用计算机进行教学。本书附带光盘中提供EWB的电路仿真，可用于技术实践和问题分析。除此之外，还提供Multisim的在线辅导。

本书内容可大致分为：第1章到第4章基本上是物理中电学部分的复习，可以用较快的速度进行教学；第6章到第10章属于直流电阻电路，是整个分析电路的基础，用于解决已给出电路如何列方程的问题；第11章到第15章主要解决交流电路和动态元件；从16章开始，讲解交流电路中的问题。探讨如何用直流电阻电路列方程的方法和动态元件解决交流电路列方程的问题；本书最后讲解了多相电源。

本书的前言由谢征翻译；第1章到第4章、第22章、附录及答案由方芸翻译；第5章到第7章、第21章由吴莹莹翻译；第8章、第9章、部分第10章由杨帆翻译；部分第10章、第11章、部分第12章由张峰翻译；部分第12章、第13章、第14章由褚天汉翻译；第15章、第16章由梁蕻翻译；第18章到第20章由张彦梅翻译；第17章、术语表由吴莹莹、方芸翻译。全书由罗伟雄负责审校、通稿。

前　　言

本书为《电路原理》第七版，涵盖了有关电元件和电路的完整而简明的基础知识，重点强调了分析、应用和技术实践[①]。与前一版本相比，这一版本做了很多改进，但内容与结构基本保持不变。

新特点与改进

技术实践测验　每一章末尾附有一个多重选择的测验，用于测试学生对电路现象的掌握情况，这些电路现象是由于某一变化或错误所引起的。引入另一个电路参数的错误或变化时，学生必须能确定一个特定的量或参数是否增加、减少或保持不变。在每一章的末尾给出答案。

工程标注　第1章的扩充内容中讲述了工程标注，以及在科学和工程标注模式下计算器的使用。

电气安全　第2章中介绍了有关电气安全的内容，以一些"安全提示"作为补充。"安全提示"出现在正文中适当的位置。

技术实践　从3.6节开始介绍技术实践，这是改进的内容。在很多技术实践部分和例题当中，介绍并使用了一种称为分析、计划和测量（APM，analysis，planning，and measurement）的系统方法。

电路仿真　在本书附带的光盘中有EWB（Electronics Workbench）电路仿真环境，用于技术实践和问题分析。除此之外，还增加了Multisim仿真电路。为了保证向后兼容性，考虑到那些还没有升级到Multisim的用户，我们保留了EWB文件。

电路仿真辅导　网站上仍继续提供有关EWB和PSpice的辅导教程。除此之外，现在还提供了Multisim的在线辅导教程。所有的辅导都可以从www.prenhall.com/floyd下载以供学生使用。

主要术语　每一章中的术语都是很重要的。每一章的开始都列出了本章的主要术语。在每章末尾及本书最后的术语表中给出了每个术语的定义。

答案提示　有一些注释会提示学生到哪里能找到问题及练习的答案，这些注释会出现在每一章中。

其他特点

- 章首内容包括每一章的学习目标和主要术语列表
- 基本上每一章的末尾都有技术实践部分
- 书中附有大量高质量的插图
- 包含大量实例
- 每一章都配有与实例相关的问题，而且在最后附有答案

---

① 本书中的技术实践主要指故障检修。——编者注

- 每一章的末尾都有章节复习题并配有答案
- 许多章节都包含技术实践部分
- 每一章的末尾都配有自测题及答案
- 每一章的末尾都附有小结和公式清单
- 每一章中都配有针对本章的习题。本版增加了更多有难度的题目,这些题目会用星号标示出来。题号为奇数的问题配有答案,答案在本书的后面给出
- 书后的术语表给出了书中所有主要术语的定义
- 采用传统的电流方向(本书另一个版本中采用电子流动方向作为电流方向)

补充学习资料

Electronics Workbench/Multisim 光盘 随书附带光盘中有一套 EWB 仿真电路文件和一套与本书中的问题相对应的 Multisim 电路仿真文件。这些电路中的很多都隐藏着错误。此光盘还含有 Multisim 的增强教科书版本,便于读者阅读所提供的电路文件。如果读者需要把 Electronics Workbench 软件用于其他用途,可以购买此软件。购买该软件请与当地的 Prentice Hall 销售代表或 Electronics Workbench 联系。

支持网站(www.prenhall.com/floyd) 此网站面向学生提供测试的机会。在网上,学生可以测试自己的学习进展情况并且可以回答测试样题。

章节结构特点说明

章首 每一章章首的内容包括每一章的学习目标、主要术语列表,以及包括补充材料和学习辅导资料的网络资源。

每节复习 每一节的最后都有复习,由若干问题或者练习组成,强调了每一节里介绍的主要概念。复习的答案在每一章的末尾给出。

实例与练习 每章都有大量的实例,有助于解释和阐明基本概念和具体的分析过程。每一个实例的最后都有一个相关问题练习,要求学生解决与实例相似的问题,这些练习强化并且扩展了实例本身的要求。

技术实践 很多章都含有技术实践部分,与每一章的主题密切相关,同时强调逻辑思维和 APM 结构化方法。在适当的地方还会用到特殊的技术实践方法,比如半分法。

实践中的技术理论(简称为技术实践) 这是每一章(第 1 章和第 22 章除外)最后的一个特殊部分,给出与每一章中特定主题相关的实际应用。每一个技术实践部分都有一系列学习方法,包括附有电路图的电路板布线比较,电路分析,使用确定电路工作状态的仪器,某些情况下还包括开发简单的测试过程。技术实践的结果和答案可以在指导资料手册中找到。

章末内容 以下是每一章末的教学内容:

- 小结
- 主要术语
- 公式
- 自测题

- 技术实践练习(故障检修测验)
- 习题
- 答案

对使用本书进行电路教学的建议

课程重点突出 本书极具灵活性,是针对两学期课程系列而编写的。其中关于直流的内容(第1章至第10章)在第一学期讲授,关于交流的内容(第11章至第22章)在第二学期讲授。在一学期中讲授完直流与交流的内容也是可行的,但是需要很好地选择和缩减某些内容。

通常情形下,时间的限制或课程的侧重点会影响所讲授的内容。如果是这样,选择教学内容有几种备选方案。以下,我们提出了忽略或者删节某些内容的建议。这并不意味着某些内容相对来说不重要,但是在具体专业的背景下,这些内容不像非常基础的内容一样必须加以高度重视。因为课程重点、层次和授课时间随专业的不同而不同,因此必须基于具体的需求来忽略或者缩减某些内容。由此,以下建议仅作为一个总的指导原则。

1. 可以考虑将以下各章作为删节或可选内容:
   - 第8章,电路理论和变换
   - 第9章,支路、网孔和节点分析
   - 第10章,磁场和电磁场
   - 第19章,基本滤波器
   - 第20章,交流分析中的电路定理
   - 第21章,电抗电路的脉冲响应
   - 第22章,电力应用中的多相位系统
2. 技术实践和故障检修部分是可以删节的,这不会影响到其他教学内容。
3. 在讲述内容连贯的基础上,指导教师可以忽略或删节其他一些具体内容。

指导教师可以慎重地按照教学需要改变课本中内容的先后次序。例如,有关电容器和电感器的内容(第13章和第14章)可以放在第一学期直流课程的最后讲授,而将13.6节、13.7节、14.6节和14.7节中关于交流的内容推迟到第二学期讲授。另一种方案是将第13章和第14章的内容放在第二学期讲授,但是要在第13章(电容器)后紧接着讲授第16章(*RC* 电路),在第14章(电感器)后紧接着讲授第17章(*RL* 电路)。

技术实践 这一部分将会介绍基本概念和元器件的应用,有助于激发读者的兴趣。对于如何应用有以下建议:

- 作为一章中的组成部分,用于解释说明如何将概念和元器件应用于实践中。可将此任务布置为家庭作业。
- 作为附加学分的作业。
- 作为课堂活动,以促进课堂讨论和教师与学生的互动,帮助学生理解为什么需要掌握这些知识。

电抗电路的讲授 第16章到第18章使教师可以方便地运用网种教学方法来讲授电抗电路的内容。

第一种是基于元件来讲授相关内容。也就是说，首先讲解第 16 章（*RC* 电路），然后讲授第 17 章（*RL* 电路），最后讲授第 18 章（*RLC* 电路与谐振）。

第二种是基于电路类型来讲授相关内容。也就是说，首先讲授有关串联电抗电路的所有内容，然后讲解有关并联电抗电路的所有内容，最后讲述有关串并联电抗电路的所有内容。为了便于应用此方法，每一章分成以下几个部分：第一部分介绍串联电抗电路，第二部分介绍并联电抗电路，第三部分介绍串并联电抗电路，第四部分介绍特殊主题。所以，对于串联电抗电路，可以按顺序讲授这三章中的第一部分；对于并联电抗电路，可以按顺序讲授这三章中的第二部分；对于串并联电抗电路，可以按顺序讲授这三章中的第三部分；最后讲授这三章中的第四部分。

致学生

任何职业训练都需要付出刻苦的努力，电子学也不例外。学习新知识最好的方法是阅读、思考和操作。本书的编排可以对你提供帮助，书中包括总览、每一节的学习目标、大量的实例、实践练习以及配有答案的复习题。

不要期望在阅读一遍之后，就可以对每一个概念了解得非常清楚。仔细阅读课本中的每一节，并且思考一下自己都读了些什么内容。在尝试解答例题后面的相关习题之前，先逐步将例题解答出来。有些时候需要不止一遍地阅读某些部分的内容。在每一节之后，通过回答各节的复习题来检查你对内容的理解。

复习每章的小结和公式，做多重选择的自我测试题，最后解答每一章后面的问题。在每一章的末尾，可以核对你的技术实践测验和自我测试的答案；在本书的末尾提供了奇数标号习题的答案。解决问题是检查理解程度和巩固概念最重要的方式。

电子学领域的职业机会

电子学领域丰富多彩，在很多方面都可获得职业机会。由于电子学在当前有着多方面的应用，并且新技术正在快速发展，因此电子学的将来无可限量。在我们的生活当中，几乎没有一个领域未曾经历通过某种程度电子技术应用的增强和改善。在这些领域中，对于全面掌握有关电气和电子的基础知识并且愿意继续深造的专业技术人员始终有极大的需求。

我们不得不再三强调彻底理解本书中基本原理的重要性——大多数雇主更喜欢聘用的人员是，不仅在基本知识和技能方面有全面扎实的基础，而且渴望学习新的知识和技术。如果你已经在基础知识方面进行了良好的培训，雇主往往会在指派你做工作的具体项目中对你再次进行培训。

经历过电子技术培训的人员往往可以胜任多种类型的工作。以下简要讨论了几种最普遍的工作。

维修公司技术员　这一类型的技术员工负责修理或者调整商业用途的和客户手上的电子设备，这些设备由于需要进行维修而返回到销售商或生产商那里。这些领域的具体产品包括：电视机、录像机、CD 播放机、立体声设备、民用波段收音机，以及计算机硬件等。该领域中也有（个体）自主经营的机会。

工业生产技师　生产员工负责在生产线上测试电子产品，或者负责维护和检修用于产品生产和测试的电子和机电系统。实际上，无论生产什么产品，各种类型的工厂都要使用电子控制的自动化设备。

实验室技师 这些技术人员通常在研究与开发实验室里负责制作实验电路板和原型，也可能负责测试新的或修改过的电子系统。在产品的开发阶段，他们通常与工程师紧密配合。

领域服务技术员 领域服务人员在用户处维护及修理电子设备——例如计算机系统、雷达设施、自动银行设备和安全系统。

工程助理/助理工程师 在设想的实现以及电子系统基本的设计和开发阶段，此类人员与工程师紧密配合。工程助理经常需要在一个项目中从最初的设计阶段一直服务到早期生产阶段。

技术编撰 技术编撰汇总技术信息，并且利用这些信息编写手册及制作音像资料。从事此类工作的基本要求是：具有对特定系统的广博知识，并且拥有能清楚地解释系统原理及操作的能力。

技术销售 对于高科技产品，需要经过技术培训的人员作为销售代表。对技术概念的理解能力以及将产品的技术特点传达给潜在客户的能力是非常有价值的。在此领域中，正如技术编撰一样，口头及书面表达能力是至关重要的。事实上，对于任何技术工作类型来说，好的交流和沟通能力都是很重要的。因为，为了使其他人能够很容易地理解你所做的事情，你必须能够清晰地记录数据并且解释程序、结论和行为。

电子学领域的里程碑

在开始学习电路之前，让我们简要地回顾一下对今天的电子技术起到了关键作用的一些重要发展历程。在电学和电磁学领域中，很多早期先驱者的姓名还以熟悉的单位和量的名称的形式存留在我们的记忆当中，比如欧姆、安培、伏特、法拉、亨利、库仑、奥斯特和赫兹。这些名字都是一些著名的例子。更加著名的人物，如富兰克林和爱迪生，在电学和电子学历史上具有举足轻重的地位，他们对电学和电子学做出了巨大的贡献。

电子学的起源 早期的电子试验包括真空管中的电流。Heinrich Geissler (1814 ~ 1879) 将玻璃试管中的空气基本抽空，发现有电流流过时试管发光。后来，William Crookes (1832 ~ 1919) 发现真空管中的电流似乎是由微粒组成的。Thomas Edison(1847 ~ 1931)用带有极板的碳丝灯泡做实验，发现在热的灯丝与正电极板之间有电流。他为此申请了专利，但从未加以利用。

另一些早期的实验测量了在真空管里流动的微粒的特性。Joseph Thompson 爵士(1856 ~ 1940)测量了这些微粒的特性，后来将其称为电子。

虽然无线电报通信可以追溯到 1844 年，但是电子学基本上是 20 世纪的概念，因为它起源于真空管放大器的发明。John A. Fleming 在 1904 年制造出了一个早期的真空管，在其中只允许电流向一个方向流动。这个器件称为 Fleming 管，是真空二极管的始祖。在 1907 年，Lee deForest 将一个栅极加到真空管中。这个称为声子(audiotron)的新器件可以放大微弱信号。由于加上了这个控制电极，deForest 掀起了电子学的变革浪潮。该器件的改进版本使得横贯大陆的电话服务及无线电成为可能。1912 年，在加利福尼亚的圣何塞，已经有无线电业余爱好者进行定期的音乐广播了。

1921 年，美国商业部长 Herbert Hoover 给一个无线电广播站发放了第一个许可证，其后的两年间共发放了 600 多个许可证。到 20 世纪 20 年代末，很多家庭都有了无线电收音机。Edwin Armstrong 发明了一种新型的超外差式无线电收音机，解决了高频通信问题。1923 年，美国研究员 Vladimir Zworykin 发明了第一个电视显像管；1927 年，Philo T. Farnsworth 为一个完整的电视系统申请了专利。

20世纪30年代无线电技术有了很大的发展，包括金属壳电子管、自动增益控制、小型收录机和方向性天线等。最早的电子计算机也是在这10年中开始开发的。现代计算机的根源可以追溯到衣阿华州立大学 John Atanasoff 的工作。从1937年开始，他就预想设计一台能够进行复杂数学运算的二进制机器。1939年，他和研究生 Clifford Berry 创造出了一台叫做 ABC(Atanasoff-Berry Computer)的二进制机器。这台机器使用真空管进行逻辑运算，用电容器作为存储器。1939年，Henry Boot 和 John Randall 在英国发明了磁控电子管——一个微波振荡器。同年，Russell 和 Sigurd Varian 在美国发明了速调微波管。

在二战期间，电子学得到了快速发展，磁控管和速调管使得雷达和甚高频通信的实现成为可能。阴极射线管改进后用于雷达。战争期间计算机开发工作继续进行。1946年，John von Neumann 在宾夕法尼亚大学开发出了第一台存储程序的计算机，称为 Eniac(真正实现 Eniac 的工程技术人员是 Presper Eckert 和 John Mauchly)。这个时期以晶体管的发明而告结束，这是该领域最重要的发明之一。

固态电子学 用于早期无线电收音机的晶体检波器是现代固态器件的始祖。然而，固态电子学的时代始于1947年——贝尔实验室中晶体管的发明，发明者是 Walter Brattain，John Bardeen 和 William Shockley。1947年出现了印制电路板，发明了晶体管。1951年，在宾夕法尼亚的艾伦镇开始了晶体管的商业化生产。

20世纪50年代最为重要的发明是集成电路。1958年9月12日，Jack Kilby 在美国德州仪器公司制造了第一个集成电路。这一发明实际上揭开了现代计算机时代的序幕，并且给医疗、通信、生产和娱乐业带来了彻底的变革。从那以后，数以十亿计的“芯片”(集成电路后来称为芯片)制造了出来。

20世纪60年代开始太空竞争，刺激了设备小型化和计算机化的进程。因此太空竞争是电子学迅速发展背后的驱动力。1965年，Bob Widlar 在 Fairchild(仙童)半导体公司设计出了第一个成功的运算放大器，这个称为 μA709 的运算放大器(“op-amp”)虽然十分成功，但是仍有“锁定”及其他问题。后来，最流行的运算放大器741在 Fairchild 公司成型，这个运算放大器成为工业标准，并且在后来的多年中影响着运算放大器的设计。

1971年，一家新的公司开发出了微处理器。这家新公司由一组来自 Fairchild 公司的人员组成，实际上就是 Intel(英特尔)公司。该产品就是4004芯片，拥有与 Eniac 计算机同样的处理能力。就在同一年，Intel 公司发布了第一个8位处速器8008。1975年，Altair 推出了第一部个人计算机，“Popular Science”杂志在1975年1月号的封面上登出了它的特写。20世纪70年代也是袖珍计算器而世和光集成电路有了新发展的时期。

到了20世纪80年代，美国近一半的家庭都使用电缆耦合器取代电视天线。电子产品的可靠性、速度和小型化继续在20世纪80年代稳步发展，其中包括印制电路板的自动测试和校准。计算机成了仪器仪表的组成部分，并且产生了虚拟仪器，计算机成为工作平台上的一个标准工具。

20世纪90年代是互联网广泛应用的时期。1993年只有130个网站，而现在已有几百万个网站。各公司蜂拥而上建立自己的主页，很多无线电广播的早期发展和互联网类似。在1995年，FCC 为一个新出现的、称为数字音频无线电服务的项目分配了频谱空间。1996年，FCC 为下一代广播电视采用了数字电视标准。

2001年1月，21世纪已经来临。这些年主要的技术发展将是互联网的爆炸性增长，互联网上的通信量每100天增加一倍，看不到终止的势头。这些技术的未来将比以往更加辉煌。

致谢

很多有才能的人参与了本版《电路原理》的出版工作。本书的内容和准确性经过了详尽的检查和审阅。Prentice Hall 的 Rex Davidson,Kate Linsner 和 Dennis Williams 等人在本书从加工到印制的各个阶段中付出了极大的努力。Lois Porter 出色地完成了手稿的编辑工作,她对细节把握的准确程度简直超乎我们的想像。Jane Lopez 再次为本书提供了精美的插图和图片。Gary Snyder 为第七版创建了用于 Electronics Workbench 和 Multisim 特性的电路文件,上一版中这项工作也是由他负责的。

这里谨对所有已提到的和未提到的,对本书提出了许多有价值的建议和建设性意见,并给本书以极大影响的人们致以诚挚的谢意! 谨向 Lakeland Community College 的 Herbert Hall, Delaware Tech and Community College 的 Leslie E. Johnson, Ivy Tech State College 的 Steve Kuchler, Ridgewater College 的 Stuart Peterson, Denver Technical College 的 Charles R. Morgan, Northwest State Community College 的 Jon Speer 和 Kirkwood Community College 的 Victor L. Stateler 致谢!

Tom Floyd

目　　录

第1章　元件、量和单位 …… 1
　引言 …… 1
　1.1　电子元件和测量仪器 …… 1
　1.2　电学和磁学的单位 …… 5
　1.3　科学计数法 …… 6
　1.4　工程计数法和国际单位词头 …… 9
　1.5　国际制单位的转换 …… 12
第2章　电压、电流和电阻 …… 18
　引言 …… 18
　2.1　原子结构 …… 19
　2.2　电荷 …… 22
　2.3　电压 …… 24
　2.4　电流 …… 26
　2.5　电阻 …… 28
　2.6　电路 …… 35
　2.7　基本电路测量 …… 41
　2.8　安全用电 …… 46
　技术实践 …… 48
第3章　欧姆定律 …… 59
　引言 …… 59
　3.1　欧姆定律 …… 59
　3.2　计算电流 …… 61
　3.3　计算电压 …… 63
　3.4　计算电阻 …… 65
　3.5　电流、电压和电阻的关系 …… 66
　3.6　故障检修介绍 …… 68
　技术实践 …… 71
第4章　能量和功率 …… 80
　引言 …… 80
　4.1　能量和功率 …… 80
　4.2　电路中的功率 …… 82
　4.3　电阻的额定功率 …… 84
　4.4　电阻的能量转换和压降 …… 87

4.5 电源 …… 88
技术实践 …… 90
第5章 串联电路 …… 97
引言 …… 97
5.1 串联电阻 …… 97
5.2 串联电路中的电流 …… 99
5.3 串联电路的总电阻 …… 101
5.4 串联电路中的欧姆定律 …… 103
5.5 串联的电压源 …… 106
5.6 基尔霍夫电压定律 …… 108
5.7 分压器 …… 111
5.8 串联电路中的功率 …… 115
5.9 电路接地 …… 117
5.10 故障检修 …… 120
技术实践 …… 124
第6章 并联电路 …… 138
引言 …… 138
6.1 并联的电阻 …… 138
6.2 并联电路的电压 …… 141
6.3 基尔霍夫电流定律 …… 142
6.4 并联电路的总电阻 …… 145
6.5 并联电路中的欧姆定律 …… 150
6.6 并联的电流源 …… 152
6.7 分流器 …… 153
6.8 并联电路中的功率 …… 156
6.9 并联电路应用实例 …… 157
6.10 故障检修 …… 161
技术实践 …… 165
第7章 串并联电路 …… 179
引言 …… 179
7.1 确定串并联关系 …… 179
7.2 串并联电路分析 …… 184
7.3 带有电阻负载的分压器 …… 189
7.4 伏特表的负载效应 …… 193
7.5 梯形网络 …… 195
7.6 惠斯通电桥 …… 199
7.7 故障检修 …… 202
技术实践 …… 206

第 8 章　电路理论和变换 …… 221
引言 …… 221
8.1　直流电压源 …… 221
8.2　电流源 …… 223
8.3　源变换 …… 224
8.4　叠加定理 …… 227
8.5　戴维南定理 …… 231
8.6　诺顿定理 …… 239
8.7　最大功率传递定理 …… 241
8.8　三角形－星形(Δ-Y)变换和星形－三角形(Y-Δ)变换 …… 243
技术实践 …… 247
第 9 章　支路、网孔和节点分析 …… 262
引言 …… 262
9.1　支路电流法 …… 262
9.2　行列式法 …… 265
9.3　用计算器求解联立方程 …… 271
9.4　网孔电流法 …… 272
9.5　节点电压法 …… 276
技术实践 …… 279
第 10 章　磁场和电磁场 …… 288
引言 …… 288
10.1　磁场 …… 288
10.2　电磁场 …… 291
10.3　电磁装置 …… 296
10.4　磁滞 …… 299
10.5　电磁感应 …… 301
10.6　电磁感应的应用 …… 304
技术实践 …… 308
第 11 章　交流电流和交流电压的介绍 …… 315
引言 …… 315
11.1　正弦波 …… 316
11.2　正弦电压源 …… 320
11.3　正弦波的电压值和电流值 …… 323
11.4　正弦波的角度测量 …… 326
11.5　正弦波公式 …… 329
11.6　交流电路中的欧姆定律和基尔霍夫定律 …… 331
11.7　直流电压和交流电压的叠加 …… 333
11.8　非正弦波形 …… 335

11.9 示波器 …… 341
技术实践 …… 346
第 12 章 相量和复数 …… 359
引言 …… 359
12.1 相量介绍 …… 359
12.2 复数 …… 364
12.3 直角坐标形式和极坐标形式 …… 366
12.4 复数的数学运算 …… 372
技术实践 …… 376
第 13 章 电容 …… 382
引言 …… 382
13.1 基本电容 …… 382
13.2 电容种类 …… 388
13.3 串联电容 …… 393
13.4 并联电容 …… 396
13.5 直流电路中的电容 …… 397
13.6 交流电路中的电容 …… 404
13.7 电容应用 …… 409
13.8 电容测试 …… 413
技术实践 …… 415
第 14 章 电感 …… 428
引言 …… 428
14.1 基本电感元件 …… 428
14.2 电感元件的类型 …… 434
14.3 电感的串联 …… 435
14.4 电感的并联 …… 435
14.5 直流电路中的电感元件 …… 437
14.6 交流电路中的电感元件 …… 444
14.7 电感的应用 …… 448
14.8 电感的测试 …… 450
技术实践 …… 450
第 15 章 变压器 …… 461
引言 …… 461
15.1 互感 …… 462
15.2 基本变压器 …… 463
15.3 升压变压器 …… 466
15.4 降压变压器 …… 467

15.5 次级绕组的加载 …… 467
15.6 反映负载 …… 469
15.7 负载电阻和电源内阻的匹配 …… 470
15.8 用于隔离的变压器 …… 473
15.9 实际变压器 …… 474
15.10 其他类型的变压器 …… 477
15.11 故障检修 …… 480
技术实践 …… 482
第16章 RC 电路 …… 492
引言 …… 492
16.1 RC 电路的正弦响应 …… 493
16.2 串联 RC 电路的阻抗和相移 …… 494
16.3 串联 RC 电路的分析 …… 496
16.4 并联电抗电路的阻抗和相位差 …… 501
16.5 并联 RC 电路的分析 …… 504
16.6 串－并联 RC 电路的分析 …… 508
16.7 RC 电路中的功率 …… 513
16.8 基本应用 …… 517
16.9 故障检修 …… 526
技术实践 …… 530
第17章 RL 电路 …… 546
引言 …… 546
17.1 RL 电路的正弦响应 …… 547
17.2 串联 RL 电路的阻抗和相角 …… 548
17.3 串联 RL 电路的分析 …… 549
17.4 并联电抗电路的阻抗和相角 …… 553
17.5 并联 RL 电路的分析 …… 555
17.6 串－并联 RL 电路的分析 …… 558
17.7 RL 电路中的功率 …… 561
17.8 基本应用 …… 564
17.9 故障检修 …… 570
技术实践 …… 573
第18章 RLC 电路和谐振 …… 586
引言 …… 586
18.1 串联 RLC 电路的阻抗 …… 587
18.2 串联 RLC 电路的分析 …… 588
18.3 串联谐振 …… 591
18.4 并联 RLC 电路的阻抗 …… 596

18.5 并联 *RLC* 电路的分析 …… 598
18.6 并联谐振 …… 600
18.7 串-并联 *RLC* 电路的分析 …… 603
18.8 谐振电路的带宽 …… 609
18.9 谐振的应用 …… 613
技术实践 …… 616

第 19 章 基本滤波器 …… 628
引言 …… 628
19.1 低通滤波器 …… 628
19.2 高通滤波器 …… 634
19.3 带通滤波器 …… 636
19.4 带阻滤波器 …… 640
技术实践 …… 643

第 20 章 交流分析中的电路理论 …… 652
引言 …… 652
20.1 叠加定理 …… 652
20.2 戴维南定理 …… 656
20.3 诺顿定理 …… 662
20.4 最大功率传递定理 …… 665
技术实践 …… 668

第 21 章 电抗电路的脉冲响应 …… 677
引言 …… 677
21.1 *RC* 积分器 …… 677
21.2 *RC* 积分器的单脉冲响应 …… 679
21.3 *RC* 积分器的序列脉冲响应 …… 683
21.4 *RC* 微分器的单脉冲响应 …… 687
21.5 *RC* 微分器的序列脉冲响应 …… 691
21.6 *RL* 积分器的脉冲响应 …… 693
21.7 *RL* 微分器的脉冲响应 …… 697
21.8 时间(脉冲)响应和频率响应的关系 …… 700
21.9 故障检修 …… 703
技术实践 …… 705

第 22 章 电力应用中的多相系统 …… 715
引言 …… 715
22.1 基本多相设备 …… 715
22.2 多相发电机在电力系统中的应用 …… 718
22.3 三相发电机 …… 722

22.4 三相电源/负载分析 …… 726
22.5 三相功率 …… 732
附录 A 标准阻值列表 …… 740
附录 B 电池组 …… 741
附录 C 公式推导 …… 744
附录 D 电容的色标 …… 747
奇数序号的习题答案 …… 750

第1章　元件、量和单位

引言

本章是针对电子学领域的基本介绍。主要包括电学的综述、电气和电子元件及仪器的介绍，目的是为本书所涵盖的内容提供一个预览。

通过对本章内容的学习，读者应该掌握电子学的各种单位，了解如何用不同的国际单位词头来表示电学中的量。此外，无论是使用计算机、计算器还是旧式的计算方法，科学计数法和工程计数法都是必不可少的。

本章目标

- 认识一些通用元件和测量仪器
- 列出电学和磁学的量和单位
- 用科学计数法(10的幂)来描述数值
- 运用工程计数法和国际单位词头来描述极大或极小数值
- 国际单位的相互转换

主要术语

- 电阻
- 电容
- 电感
- 变压器
- 直流电源
- 函数发生器
- 数字万用表(DMM)
- 示波器
- 科学计数法
- 10的幂
- 指数
- 工程计数法
- 国际单位词头

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

1.1　电子元件和测量仪器

对直流和交流理论背景的整体了解可以为理解复杂的电子器件和电路提供基础。本节将对电的基本类型和电子元器件进行初步的介绍，在后续章节以及其他课程中将详细介绍相关内容。

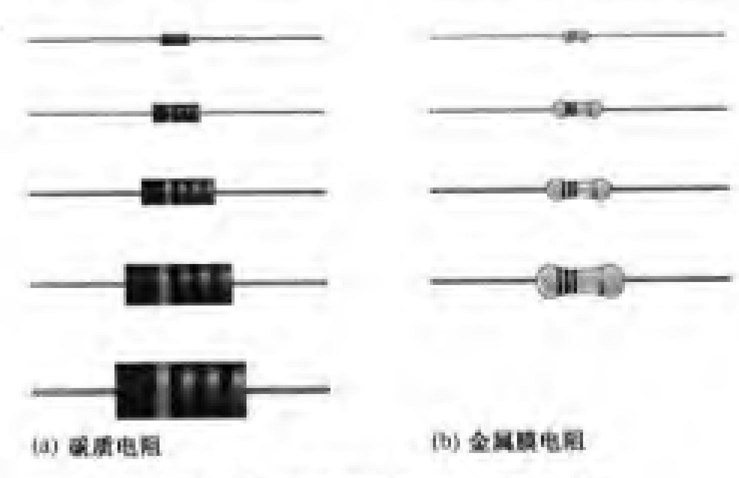
完成这一节的学习后，读者应该能够：

- 认识一些通用元件和测量仪器
- 阐述电阻的定义
- 阐述电容的定义
- 阐述电感的定义

- 阐述变压器的定义
- 列出一些基本类型的电子测试和测量仪器

1.1.1　电阻

电阻[①]阻碍或限制电路中电流的通过。图 1.1 到图 1.4 列出了几种常见的电阻。



(a) 碳质电阻　　(b) 金属膜电阻

图 1.1　两种常见类型的定值电阻



(a) 金属膜贴片电阻　(b) 片式排阻　(c) 电阻网络（simm安装）　(d) 电阻网络（表面安装）

图 1.2　贴片电阻和电阻网络

(a) 轴向引脚线绕电阻　(b) 可调线绕电阻　(c) 可插入印刷电路板的径向引脚电阻　(d) 表面安装

图 1.3　常见类型的电阻器

(a) 引脚安装　(b) 表面安装

图 1.4　常见类型的可变电阻

① 粗体字是主要术语，本书中所有主要术语的定义都汇总在书末的术语表中。

1.1.2　电容

电容储存电荷，常常用来阻断直流，导通交流。图1.5和图1.6列出了几种类型的电容。



(a) 电解电容，轴向引脚和表面安装

(b) 陶瓷电容，轴向引脚和表面安装

(c) 薄膜电容，轴向引脚和贴片安装

图1.5　几种常见的定值电容

图1.6　几种常见的可变电容

1.1.3　电感

电感也称为线圈，在电磁学领域中常常用来储存能量，可以在电路中提供很多有用的功能。图1.7列出了几种类型的电感。



图1.7　一些固定的和可变的电感

1.1.4 变压器

变压器用来将交流电压从电路中的某一点磁耦合到另一点，或用来升高或降低交流电压。图 1.8 列出了几种小型变压器。电力公司运用大型变压器改变电压以便利用高压线传输电力。

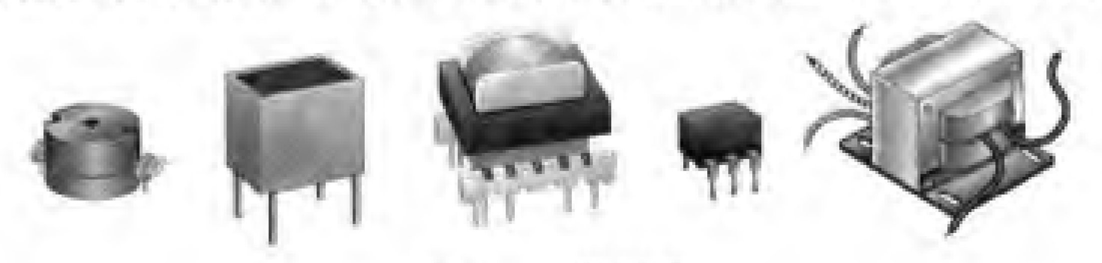


图 1.8 典型的变压器

1.1.5 半导体器件

图 1.9 列出了几种二极管、晶体管和集成电路。读者将在后续章节中学习相关的内容。

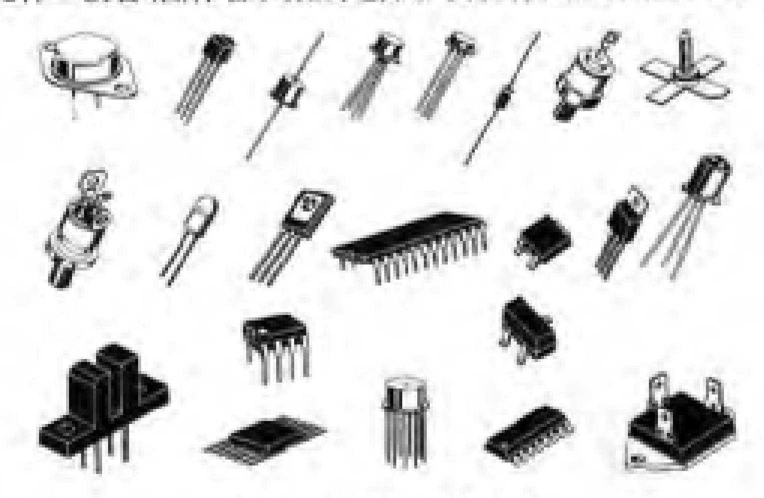


图 1.9 半导体器件分类

1.1.6 电子仪器

图 1.10 列出了本书将要讨论的基于典型实验室平台的四种基本电子仪器。这些仪器包括为电路提供电流和电压的直流电源，提供电子信号的函数发生器，同时具有测量电压的伏特表功能，测量电流的安培表功能和测量电阻的欧姆表功能的**数字万用表**(DMM，digital multimeter)，以及用来观察和测量交流电压的示波器。

1.1 节练习

1. 列举四种常用电元件的名称。
2. 什么仪器可以用来测量电流?
3. 什么仪器可以用来测量电阻?
4. 什么仪器可以用来测量电压?
5. 什么是万用表?



(a) 直流电源　(b) 函数发生器

(c) 数字万用表　(d) 数字存储示波器

图 1.10 典型电子仪器实物图(使用本图经过 B&K Precision Corp. 的许可)

1.2 电学和磁学的单位

在电子学中，必须对被测值进行处理。例如，必须能表示在某个电路测试点的电压是多少，通过一个电感元件的电流是多少，或者某个放大器提供的功率是多少。在本节中，读者将学到本书中所用到的大部分电学和磁学的量、单位及其表示符号。

完成这一节的学习后，读者应该能够：

- 列出电学和磁学的量及其单位
- 为每一个量指定表示符号
- 为每一个单位指定表示符号

在电子学中常用字母来表示量和单位。一类符号用来代表量的名称，另一类符号用来代表该量所测得数值的单位。例如，*P* 代表的是功率，而 W 代表的是功率的单位——瓦特。再以电压为例，电压的符号及其单位符号都是用同一个字母，斜体 *V* 表示电压，而正体的 V 表示电压的单位——伏特。总之，斜体字母表示量，而正体字母表示量的单位。

表 1.1 列出了最重要的一些电学量，及其 SI 单位和表示符号。SI 是国际单位制(Système International，法语)的缩写。表 1.2 列出了磁学的量，及其 SI 单位和表示符号。

1.2 节练习

1. 什么是 SI 标准?
2. 不参考表 1.1，尽可能多地列出电学的量，包括符号、单位和单位符号。
3. 不参考表 1.2，尽可能多地列出磁学的量，包括符号、单位和单位符号。

表 1.1 电学的量、单位和 SI 符号

量	符号	单位	单位符号
电容	C	法拉	F
电荷	Q	库仑	C
电导	G	西门子	S
电流	I	安培	A
能量	W	焦耳	J
频率	f	赫兹	Hz
阻抗	Z	欧姆	Ω
电感	L	亨利	H
功率	P	瓦特	W
电抗	X	欧姆	Ω
电阻	R	欧姆	Ω
时间	t	秒	s
电压	V	伏特	V

表 1.2 磁学的量、单位和 SI 符号

量	符号	单位	单位符号
磁通密度	B	特斯拉	T
磁通量	ϕ	韦伯	Wb
磁场强度	H	安(匝/米)	At/m
磁通势	F_m	安(匝)	At
磁导率	μ	韦伯/安(匝/米)	Wb/Atm
磁阻	R_m	安(匝/韦伯)	At/Wb

1.3 科学计数法

电学和电子学的领域中存在着很多太小或太大的值。举例来说,通常电流的值只有一安培的几千分之一或几百万分之一;而另一方面,电阻的值却能够达到几千或几百万欧姆。这种情况在很多电学的量中是非常典型的。

完成这一节的学习后,读者应该能够:

- 用科学计数法(10 的幂)来描述量
- 用 10 的幂描述数据
- 掌握 10 的幂的计算

科学计数法为描述大数值、小数值和这些数值的计算提供了一种简便方法。所谓科学计数法,是将一个数值用一个从 1 到 10 中的任意数字和 10 的幂的乘积来表示。例如,数值 150 000 用科学计数法可以表示为 1.5×10^5,而数值 0.000 22 可以表示为 2.2×10^{-4}。

1.3.1 10 的幂

表 1.3 列出了一些 10 的幂,包含正次幂和负次幂,以及对应的十进制数。10 的幂用以 10 为底的指数(10^x)来表示。指数决定了小数点向左或向右移动的方向以及移动的位数。如果 10 的幂为正,则小数点向右移动得到对应的十进制数。例如,一个指数为 4 的 10 的幂为:

$$10^4 = 1 \times 10^4 = 1.0000. = 10\,000$$

如果 10 的幂为负，则小数点向左移动得到对应的十进制数。例如，一个指数为 -4 的 10 的幂为：

$$10^{-4} = 1 \times 10^{-4} = .0001. = 0.0001$$

表 1.3　一些正指数和负指数幂

$10^6 = 1\,000\,000$	$10^{-6} = 0.000\,001$
$10^5 = 100\,000$	$10^{-5} = 0.000\,01$
$10^4 = 10\,000$	$10^{-4} = 0.0001$
$10^3 = 1000$	$10^{-3} = 0.001$
$10^2 = 100$	$10^{-2} = 0.01$
$10^1 = 10$	$10^{-1} = 0.1$
$10^0 = 1$	

例 1.1　用科学计数法表示下列数字。

(a) 200　(b) 5000　(c) 85 000　(d) 3 000 000

解：在上述情况下，如果要转换成科学计数法，小数点的位置需要向左移动一定的位数，故 10 的幂为正。

(a) $200 = \mathbf{2 \times 10^2}$　(b) $5000 = \mathbf{5 \times 10^3}$

(c) $85\,000 = \mathbf{8.5 \times 10^4}$　(d) $3\,000\,000 = \mathbf{3 \times 10^6}$

练习[①]：用科学计数法表示 4750。

例 1.2　用科学计数法表示下列数字。

(a) 0.2　(b) 0.005　(c) 0.000 63　(d) 0.000 015

解：在上述情况下，如果要转换成科学计数法，小数点的位置需要向右移动一定的位数，故而 10 的幂为负。

(a) $0.2 = \mathbf{2 \times 10^{-1}}$　(b) $0.005 = \mathbf{5 \times 10^{-3}}$

(c) $0.000\,63 = \mathbf{6.3 \times 10^{-4}}$　(d) $0.000\,015 = \mathbf{1.5 \times 10^{-5}}$

练习：用科学计数法表示 0.007 38。

例 1.3　用标准十进制数表示下列数字：

(a) 1×10^5　(b) 2×10^3　(c) 3.2×10^{-2}　(d) 250×10^{-6}

解：对应于正指数幂或负指数幂，小数点的位置需要分别向右或向左移动。

(a) $1 \times 10^5 = \mathbf{100\,000}$　(b) $2 \times 10^3 = \mathbf{2000}$

(c) $3.2 \times 10^{-2} = \mathbf{0.032}$　(d) $2.5 \times 10^{-6} = \mathbf{0.000\,002\,5}$

练习：用标准十进制数表示 9.12×10^3。

1.3.2　应用 10 的幂计算

科学计数法有利于进行大数值和小数值的加减乘除运算。

加法　10 的幂的加法运算步骤如下：

1. 将被加数用相同的 10 的幂来表示。

---

① 答案在本章末尾。

2. 不包含 10 的幂,只将两个被加数前面的数字相加求和。
3. 提取两个被加数所共有的 10 的幂,这就是 10 的幂的加法运算之和。

例 1.4 用科学计数法计算 2×10^6 与 5×10^7 的和,并用科学计数法表示该结果。

解: 1. 将两个数用相同的 10 的幂来表示:$(2\times10^6)+(50\times10^6)$;

2. 进行加法计算:$2+50=52$;

3. 提取两个数所共有的 10 的幂(10^6),和是 $52\times10^6=\mathbf{5.2\times10^7}$。

练习: 计算 3.1×10^3 与 5.5×10^4 的和。

减法 10 的幂的减法运算步骤如下:

1. 将减数和被减数用相同的 10 的幂来表示。
2. 不包含 10 的幂,只将减数和被减数前面的数字相减求差。
3. 提取减数和被减数所共有的 10 的幂,这就是 10 的幂的减法运算之差。

例 1.5 用科学计数法计算 7.5×10^{-11} 减去 2.5×10^{-12} 的差,并用科学计数法表示该结果。

解: 1. 将减数和被减数用相同的 10 的幂来表示:$(7.5\times10^{-11})-(0.25\times10^{-11})$;

2. 进行减法运算:$7.5-0.25=7.25$;

3. 提取减数和被减数所共有的 10 的幂(10^{-11}),差是 $\mathbf{7.25\times10^{-11}}$。

练习: 计算 2.2×10^{-5} 减去 3.5×10^{-6} 的差。

乘法 10 的幂的乘法运算步骤如下:

1. 不包含 10 的幂,直接将两个乘数前面的数字相乘求积。
2. 将 10 的幂进行代数相加(幂不一定要相同)。

例 1.6 用科学计数法计算 5×10^{12} 与 3×10^{-6} 的积,并用科学计数法表示该结果。

解: 数值相乘,幂代数相加,如下所示:

$$(5\times10^{12})(3\times10^{-6})=15\times10^{12+(-6)}=15\times10^6=\mathbf{1.5\times10^7}$$

练习: 计算 3.2×10^6 与 1.5×10^{-3} 的积。

除法 10 的幂的除法运算步骤如下:

1. 不包含 10 的幂,直接将被除数和除数前面的数字相除。
2. 用分子的 10 的幂减去分母的 10 的幂(幂不一定要相同)。

例 1.7 用科学计数法计算 5.0×10^8 除以 2.5×10^3 的结果,并用科学计数法表示该结果。

解: 该除法问题写成分子和分母的格式如下:

$$\frac{5.0\times10^8}{2.5\times10^3}$$

数值相除并计算 8 - 3,得:

$$\frac{5.0\times10^8}{2.5\times10^3}=2\times10^{8-3}=\mathbf{2\times10^5}$$

练习: 计算 8×10^{-6} 除以 2×10^{-10} 的结果。

1.3.3 计算器上的科学计数法

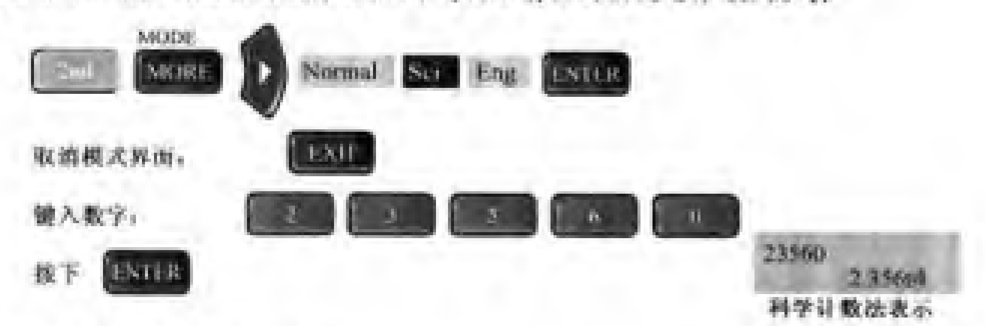
本书中以 TI-86 型计算器为例,其他类型的计算器除了一些功能上的区别外基本与其类似。

用科学计数法输入一个数据 用科学计数法输入数据有两种方法。

1. 模式界面:在模式界面下按 Sci 键。输入数据时,会自动转换成科学计数法模式(Sci 模式)。
2. EE 键:用阿拉伯数字输入小数点左边的数据,按 EE 键,然后再输入 10 的幂。这种方法需要在输入数据前先确定好 10 的幂。

例 1.8 用 Sci 模式输入数 23 560。

解: 进入带有下列顺序按键的模式界面,用带有向右箭头的按键选择 Sci 模式:



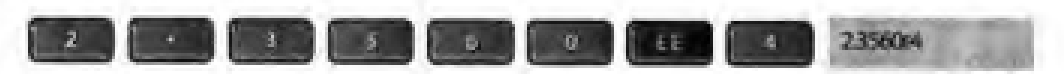
练习: 用 Sci 模式输入数 150 968。

例 1.9 使用 EE 键输入数 23 560(与例 1.8 中的相同)。

解: 将小数点向左移动 4 位,紧跟阿拉伯数字 2 后,用科学计数法表示为:

$$2.3560 \times 10^4$$

用计算器输入这个数据的方法如下:



练习: 使用 EE 键输入数 573 946。

1.3 节练习

1. 科学计数法是用 10 的幂来表示的,这个说法对还是错?
2. 用 10 的幂表示 100。
3. 用科学计数法表示下列数据:
   (a) 4350 (b) 12 010 (c) 29 000 000
4. 用科学计数法表示下列数据:
   (a) 0.760 (b) 0.000 25 (c) 0.000 000 597
5. 计算下列运算式:
   (a) $(1\times10^5)+(2\times10^5)$ (b) $(3\times10^6)(2\times10^4)$
   (c) $(8\times10^3)\div(4\times10^2)$ (d) $(2.5\times10^{-6})-(1.3\times10^{-7})$
6. 将第 3 题的数据用 Sci 模式输入计算器。
7. 将第 3 题的数据用 EE 键输入计算器。
8. 用计算器计算第 5 题的运算式。

1.4 工程计数法和国际单位词头

工程计数法是科学计数法的一种特殊形式,广泛应用于工程领域,用来表示大数值或小数

值。在电子学中,工程计数法用来表示电压、电流、功率、电阻、电容、电感,以及时间等量的数值。国际单位词头作为10的幂的缩写,常常和工程计数法配合使用。

完成这一节的学习后,读者应该能够:

- 用工程计数法和国际单位词头表示大数值和小数值
- 列出国际单位词头
- 将工程计数法中10的幂转换为国际单位词头
- 用国际单位词头表示电学的量
- 用计算器输入工程计数法的数据
- 进行国际单位词头之间的相互转换

1.4.1 工程计数法

工程计数法与科学计数法类似。然而在工程计数法中,小数点左边可以含有1到3个阿拉伯数字,并且10的幂指数必须是3的倍数。例如,数字33 000用工程计数法可以表示为33×10^3,用科学计数法则表示为3.3×10^4。再如,数字0.045用工程计数法可以表示为45×10^{-3},用科学计数法则表示为4.5×10^{-2}。

例1.10 用工程计数法表示下列数字:

(a) 82 000 (b) 243 000 (c) 1 956 000

解:在工程计数法中:

(a) 82 000表示为$\mathbf{82\times10^3}$。

(b) 243 000表示为$\mathbf{243\times10^3}$。

(c) 1 956 000表示为$\mathbf{1.956\times10^6}$。

练习:用工程计数法表示36 000 000 000。

例1.11 将下列数据用工程计数法表示:

(a) 0.0022 (b) 0.000 000 047 (c) 0.000 33

解:在工程计数法中:

(a) 0.0022表示为$\mathbf{2.2\times10^{-3}}$。

(b) 0.000 000 047表示为$\mathbf{47\times10^{-9}}$。

(c) 0.000 33表示为$\mathbf{330\times10^{-6}}$。

练习:用工程计数法表示0.000 000 000 005 6。

1.4.2 国际单位词头

国际单位词头是工程计数法中用来表示经常使用的10的幂的符号。表1.4中列出了这些国际单位词头及其名称。

表1.4 国际单位词头、符号,及其相应的10的幂和值

国际单位词头	符号	10的幂	值
皮	p	10^{-12}	万亿分之一
纳	n	10^{-9}	十亿分之一
微	μ	10^{-6}	百万分之一
毫	m	10^{-3}	千分之一
千	k	10^{3}	一千
兆	M	10^{6}	一百万
吉	G	10^{9}	十亿
太	T	10^{12}	万亿

用工程计数法表示一个数值时通常用国际单位词头来代替10的幂。国际单位词头只用于含有一个测量单位的数值，如伏特、安培和欧姆等。国际单位词头可以放置在这些单位符号的前面。例如，0.025安培可以表示为 25×10^{-3} A，也可以用国际单位词头表示为25 mA，读做25毫安，国际单位词头"毫"代表 10^{-3}。再如，100 000 000欧姆可以表示为 100×10^{6} Ω，也可以用国际单位词头表示为100 MΩ，其中国际单位词头"兆"代表 10^{6}，其符号为M。

例1.12 用适当的国际单位词头表示下列数值：

(a) 50 000 V (b) 25 000 000 Ω (c) 0.000 036 A

解：(a) 50 000 V = 50×10^{3} V = **50 kV**。

(b) 25 000 000 Ω = 25×10^{6} Ω = **25 MΩ**。

(c) 0.000 036 A = 36×10^{-6} A = **36 μA**。

练习：用适当的国际单位词头表示下列数值：

(a) 56 000 000 Ω (b) 0.000 470 A

1.4.3 工程计数法在计算器上的使用

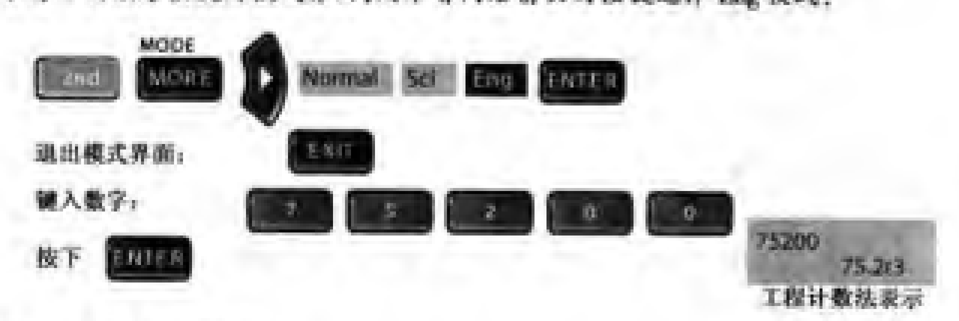
如前所述，本书提到的计算器都是基于TI-86型计算器的，其他计算器除了一些功能上的区别以外与其基本类似。

用工程计数法输入一个数值与科学计数法类似，用工程计数法同样有两种输入数值的方法。

1. 模式界面：在模式界面下选择Eng键。输入数据时，会自动转换成工程计数法。
2. EE键：输入小数点左边的第1、第2或第3个数字，然后按EE键，此后输入的10的幂指数必须是3的倍数。这种方法需要在输入数值前先确定好10的幂。

例1.13 用Eng模式输入75 200。

解：进入带有下列顺序按键的模式界面，用带有向右箭头的按键选择Eng模式：



练习：用Eng模式输入6 481 000。

例1.14 用EE键输入51 200 000。

解：小数点向左移动6位紧跟阿拉伯数字1之后，用工程计数法表示为：

$$51.2\times10^{6}$$

将数据输入计算器如下：



练习：用EE键输入273 900。

1.4 节练习

1. 用工程计数法表示下列数值:

   (a) 0.0056　(b) 0.000 000 028 3　(c) 950 000　(d) 375 000 000 000

2. 将第 1 题的数值输入计算器,并用工程计数法表示。
3. 列出下列 10 的幂所对应的国际单位词头:10^6, 10^3, 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-9}和 10^{-12}。
4. 用适当的国际单位词头表示 0.000 001 A。
5. 用适当的国际单位词头表示 250 000 W。

1.5 国际制单位的转换

许多情况下国际单位词头之间的相互转换是非常必要或非常简便的,如从毫安(mA)到微安(μA)的转换。国际单位词头的转换是依据具体情况将数据中的小数点向左或向右移动一定位数来实现的。

完成这一节的学习后,读者应该能够:

- 完成两个国际制单位之间的相互转换
- 完成毫(m)、微(μ)、纳(n)和皮(p)等国际单位词头之间的转换
- 完成千(K)和兆(M)之间的转换

国际制单位间的转换需要遵循下列规则:

1. 当一个大的国际制单位向小的国际制单位转换时,小数点应该向右移动。
2. 当一个小的国际制单位向大的国际制单位转换时,小数点应该向左移动。
3. 通过查找两个国际制单位对应的 10 的幂之差来确定小数点移动的位数。

例如,当 mA 向 μA 转换时,需要将小数点向右移动三位,因为这两个单位所对应的 10 的幂相差了三位(mA 是 10^{-3} A, μA 是 10^{-6} A)。下面举例说明几种单位的转换。

例 1.15　实现 0.15 mA 到 μA 的转换。

解:将小数点向右移动三位,

$$0.15\text{ mA} = 0.15 \times 10^{-3}\text{ A} = 150 \times 10^{-6}\text{ A} = \mathbf{150\ \mu A}$$

练习:实现 1 mA 到 μA 的转换。

例 1.16　实现 4500 μV 到 mV 的转换。

解:将小数点向左移动三位,

$$4500\ \mu\text{V} = 4500 \times 10^{-6}\text{ V} = 4.5 \times 10^{-3}\text{ V} = \mathbf{4.5\ mV}$$

练习:实现 1000 μV 到 mV 的转换。

例 1.17　实现 5000 nA 到 μA 的转换。

解:将小数点向左移动三位,

$$5000\text{ nA} = 5000 \times 10^{-9}\text{ A} = 5 \times 10^{-6}\text{ A} = \mathbf{5\ \mu A}$$

练习:实现 893 nA 到 μA 的转换。

例 1.18　实现 47 000 pF 到 μF 的转换。

解:将小数点向左移动六位,

$$47\ 000\ pF = 47\ 000 \times 10^{-12}\ F = 0.047 \times 10^{-6}\ F = \mathbf{0.047\ \mu F}$$

练习：实现 0.0022 μF 到 pF 的转换

例 1.19 实现 0.000 22 μF 到 pF 的转换。

解：将小数点向右移动六位，

$$0.000\ 22\ \mu F = 0.000\ 22 \times 10^{-6}\ F = 220 \times 10^{-12}\ F = \mathbf{220\ pF}$$

练习：实现 10 000 pF 到 μF 的转换。

例 1.20 实现 1800 kΩ 到 MΩ 的转换。

解：将小数点向左移动三位，

$$1800\ k\Omega = 1800 \times 10^{3}\ \Omega = 1.8 \times 10^{6}\ \Omega = \mathbf{1.8\ M\Omega}$$

练习：实现 2.2 kΩ 到 MΩ 的转换。

进行加法(或减法)运算时，如果存在不同的国际单位词头，需要先将其转换为相同的国际单位词头，然后再进行计算，如下例所示。

例 1.21 求 15 mA 与 8000 μA 的和，并将其用 mA 表示。

解：将 8000 μA 转换为 8 mA 并进行加法运算，

$$\begin{aligned}15\ mA + 8000\ \mu A &= 15 \times 10^{-3} A + 8000 \times 10^{-6} A \\ &= 15 \times 10^{-3} A + 8 \times 10^{-3}\ A = 15\ mA + 8\ mA = \mathbf{23\ mA}\end{aligned}$$

练习：求 2873 mA 与 10 000 μA 的和，并将其用 mA 表示。

1.5 节练习

1. 实现 0.01 MV 到 kV 的转换。
2. 实现 250 000 pA 到 mA 的转换。
3. 计算 0.05 MW 与 75 kW 的和，并将其用 kW 表示。
4. 计算 50 mV 与 25 000 μV 的和，并将其用 mV 表示。

小结

- 电阻阻碍电流通过。
- 电容存储电荷。
- 电感(也称为线圈)存储电磁能。
- 变压器是用来改变电路中两点交流电压的磁耦合器件。
- 半导体器件包括二极管、晶体管和集成电路。
- 电源提供电流和电压。
- 万用表可以测量电压、电流和电阻。
- 万用表的伏特表功能用来测量电压。
- 万用表的安培表功能用来测量电流。
- 万用表的欧姆表功能用来测量电阻。
- 科学计数法是一种描述极大数值和极小数值的简便方法。通常是将数值用一个从 1 到 10 中的任意数字(小数点左边只能有一位阿拉伯数字)和 10 的幂的乘积来表示。
- 工程计数法是科学计数法的一种形式，通常是将一个数值用 3 位阿拉伯数字和 10 的幂的乘积来表示，且 10 的幂指数必须是 3 的倍数。
- 国际单位词头是用来表示 10 的幂的符号，且 10 的幂指数必须是 3 的倍数。

主要术语

电容:一种由绝缘材料分隔开的两个导电金属板所组成的、具有存储电能性质的电器件。

直流电源:一种由交流电力线或电池通过适当方式提供功率,用来产生电压和电流的电子设备。

数字万用表(DMM):一种测量电压、电流和电阻的电子工具。

工程计数法:一种用1,2或3个阿拉伯数字和10的幂的乘积来表示数值的方法,且10的幂指数必须是3的倍数。

指数:以一个基数进行自乘的个数。

函数发生器:能够产生正弦波、三角波和脉冲等电信号的电子仪器。

电感:在电磁领域中由一个带心的线圈所构成的,在电磁场中具有自感应和储存能量能力的电器件。也称为线圈,或在一些应用中称为扼流器。

国际单位词头:在工程计数法中用来表示10的幂的符号。

示波器:一种通过屏幕显示信号波形的测量仪器。

10的幂:由一个基数10和一个指数幂所构成的一种数字表示方法,即以10为基数按幂自乘。

电阻器:专门设计的一种具有一定阻值的电元件。

科学计数法:用一个从1到10中的任意数字和10的幂的乘积来表示数值的一种方法。

变压器:一种由两个或两个以上的线圈相互耦合所组成的,提供线圈间电磁功率转换的器件。

自测题

1. 下列哪一个不是电学的量?
   (a) 电流 (b) 电压 (c) 时间 (d) 功率
2. 电流的单位是:
   (a) 伏特 (b) 瓦特 (c) 安培 (d) 焦耳
3. 电压的单位是:
   (a) 欧姆 (b) 瓦特 (c) 伏特 (d) 法拉
4. 电阻的单位是:
   (a) 安培 (b) 亨利 (c) 赫兹 (d) 欧姆
5. 赫兹是以下哪个量的单位?
   (a) 功率 (b) 电感 (c) 频率 (d) 时间
6. 15 000 W等于:
   (a) 15 mW (b) 15 kW (c) 15 MW (d) 15 μW
7. 4.7×10^3 等于:
   (a) 470 (b) 4700 (c) 47 000 (d) 0.0047
8. 56×10^{-3}等于:
   (a) 0.056 (b) 0.560 (c) 560 (d) 56 000
9. 3 300 000用工程计数法表示为:
   (a) 3300×10^3 (b) 3.3×10^{-6} (c) 3.3×10^6 (d) (a)和(c)都是
10. 十毫安可以表示成:
    (a) 10 MA (b) 10 μA (c) 10 kA (d) 10 mA
11. 五千伏特可以表示成:
    (a) 5000 V (b) 5 MV (c) 5 kV (d) (a)和(c)都是
12. 二十兆欧姆可以表示成:
    (a) 20 mΩ (b) 20 MW (c) 20 MΩ (d) 20 μΩ

习题

1.3 节　科学计数法

1. 用科学计数法表示下列数值：
   (a) 3000　(b) 75 000　(c) 2 000 000
2. 用科学计数法表示下列分数：
   (a) 1/500　(b) 1/2000　(c) 1/5 000 000
3. 用科学计数法表示下列数值：
   (a) 8400　(b) 99 000　(c) 0.2×10^{6}
4. 用科学计数法表示下列数值：
   (a) 0.0002　(b) 0.6　(c) 7.8×10^{-2}
5. 用标准十进制数表示下列数值：
   (a) 2.5×10^{-6}　(b) 5.0×10^{2}　(c) 3.9×10^{-1}
6. 用标准十进制数表示下列数值：
   (a) 4.5×10^{-6}　(b) 8×10^{-9}　(c) 4.0×10^{-12}
7. 计算下列加法运算式：
   (a) $(9.2\times10^{6})+(3.4\times10^{7})$　(b) $(5\times10^{3})+(8.5\times10^{-1})$
   (c) $(5.6\times10^{-8})+(4.6\times10^{-9})$
8. 计算下列减法运算式：
   (a) $(3.2\times10^{12})-(1.1\times10^{12})$　(b) $(2.6\times10^{6})-(1.3\times10^{7})$
   (c) $(1.5\times10^{-12})-(8\times10^{-13})$
9. 计算下列乘法运算式：
   (a) $(5\times10^{3})(4\times10^{5})$　(b) $(1.2\times10^{12})(3\times10^{3})$
   (c) $(2.2\times10^{-9})(7\times10^{-6})$
10. 计算下列除法运算式：
    (a) $(1.0\times10^{3})\div(2.5\times10^{3})$　(b) $(2.5\times10^{-6})\div(5.0\times10^{-8})$
    (c) $(4.2\times10^{6})\div(2\times10^{-5})$

1.4 节　工程计数法和国际单位词头

11. 用工程计数法表示下列数值：
    (a) 89 000　(b) 450 000　(c) 12 040 000 000 000
12. 用工程计数法表示下列数值：
    (a) 2.35×10^{5}　(b) 7.32×10^{7}　(c) 1.333×10^{9}
13. 用工程计数法表示下列数值：
    (a) 0.000 345　(b) 0.025　(c) 0.000 000 001 29
14. 用工程计数法表示下列数值：
    (a) 9.81×10^{-3}　(b) 4.82×10^{-4}　(c) 4.38×10^{-7}
15. 计算下列加法运算式，并将结果用工程计数法表示：
    (a) $(2.5\times10^{-3})+(4.6\times10^{-3})$　(b) $(68\times10^{6})+(33\times10^{6})$
    (c) $(1.25\times10^{6})+(250\times10^{3})$
16. 计算下列乘法运算式，并将结果用工程计数法表示：
    (a) $(32\times10^{-3})(56\times10^{5})$　(b) $(1.2\times10^{-6})(1.2\times10^{-6})$
    (c) $100(55\times10^{-3})$

17. 计算下列除法运算式,并将结果用工程计数法表示:

   (a) $50 \div (2.2 \times 10^3)$ (b) $(5 \times 10^3) \div (25 \times 10^{-6})$

   (c) $560 \times 10^3 \div (660 \times 10^3)$

18. 将第 11 题的数据加上单位欧姆,再用适当的国际单位词头表示。

19. 将第 13 题的数据加上单位安培,再用适当的国际单位词头表示。

20. 用适当的国际单位词头表示下列数据:

   (a) 31×10^{-3} A (b) 5.5×10^3 V (c) 20×10^{-12} F

21. 用适当的国际单位词头表示下列数据:

   (a) 3×10^{-6} F (b) $3.3 \times 10^6\ \Omega$ (c) 350×10^{-9} A

22. 用 10 的幂表示下列数据:

   (a) 5 μA (b) 43 mV (c) 275 kΩ (d) 10 MW

1.5 节 国际制单位的转换

23. 实现下列转换:

   (a) 5 mA 到 μA (b) 3200 μW 到 mW

   (c) 5000 kV 到 MV (c) 10 MW 到 kW

24. 确定下列数值:

   (a) 1 mA 相当于多少 μA?

   (b) 0.05 kW 相当于多少 mW?

   (c) 0.02 kΩ 相当于多少 MΩ?

   (d) 155 mW 相当于多少 kW?

25. 计算下列加法运算式:

   (a) 50 mA + 680 μA (b) 120 kΩ + 2.2 MΩ (c) 0.02 μF + 3300 pF

26. 计算下列运算式:

   (a) 10 kΩ ÷ (2.2 kΩ + 10 kΩ) (b) 250 mV ÷ 50 μV (c) 1 MW ÷ 2 kW

答案

1.1 节 电子元件和测量仪器

1. 常用电元件的名称为电阻、电容、电感和变压器。
2. 安培表可以用来测量电流。
3. 欧姆表可以用来测量电阻。
4. 伏特表可以用来测量电压。
5. 万用表可以用来测量电压、电流和电阻。

1.2 节 电学和磁学的单位

1. SI 是国际单位制的缩写。
2. 列举完电的量后可以参照表 1.1 来检查。
3. 列举完磁学的量后可以参照表 1.2 来检查。

1.3 节 科学计数法

1. 对
2. 10^2
3. (a) 4.35×10^3 (b) 1.201×10^4 (c) 2.9×10^7
4. (a) 7.6×10^{-1} (b) 2.5×10^{-4} (c) 5.97×10^{-7}
5. (a) 3×10^5 (b) 6×10^{10} (c) 2×10^1 (d) 2.37×10^{-6}

6. 选择 Sci 模式，输入阿拉伯数字然后按 ENTER 键。
7. 输入阿拉伯数字，按 EE 键，然后输入 10 的幂。
8. 既可以用 Sci 模式，也可以用 EE 键。输入第一个数据，按相应的算术运算键，然后再输入第二个数据，最后按 ENTER 键。

1.4 节　工程计数法和国际单位词头

1. (a) 5.6×10^{-3}　(b) 28.3×10^{-9}　(c) 950×10^{3}　(c) 375×10^{9}
2. 选择 Eng 模式，输入阿拉伯数字，然后按 ENTER 键；或者输入阿拉伯数字，按 EE 键，然后再输入 10 的幂。
3. 兆(M)、千(k)、毫(m)、微(μ)、纳(n)和皮(p)
4. 1 μA(1 微安)
5. 250 kW(250 千瓦)

1.5 节　国际制单位的转换

1. 0.01 MV = 10 kV
2. 250 000 pA = 0.000 25 mA
3. 0.05 MW + 75 kW = 50 kW + 75 kW = 125 kW
4. 50 mV + 25 000 μV = 50 mV + 25 mV = 75 mV

实例相关练习

1.1　4.75×10^{3}
1.2　7.38×10^{-3}
1.3　9120
1.4　58.1×10^{3}
1.5　1.85×10^{-5}
1.6　4.8×10^{3}
1.7　4×10^{4}
1.8　选择 Sci 模式，输入 150968，按 ENTER 键。
1.9　输入 5.73946，按 EE 键，输入 5。
1.10　36×10^{9}
1.11　5.6×10^{-12}
1.12　(a) 56 MΩ　(b) 470 μA
1.13　选择 Eng 模式，输入 6481000，按 ENTER 键。
1.14　输入 273.9，按 EE 键，输入 3。
1.15　1000 μA
1.16　1 mV
1.17　0.893 μA
1.18　2200 pF
1.19　0.01 μF
1.20　0.0022 MΩ
1.21　2883 mA

自测题答案

1.(c)　2.(c)　3.(c)　4.(d)　5.(c)　6.(b)
7.(b)　8.(a)　9.(d)　10.(d)　11.(d)　12.(c)

第2章　电压、电流和电阻

引言

若要在实际中很好地应用电子技术，则需要了解基于假设条件下的相关理论。掌握了这方面的理论之后，就能将其应用于实际中去解决问题。在本章以及后续章节中，读者将学到可以应用于实践的技术理论。

本章介绍电压、电流和电阻的概念。读者将学会如何用合适的单位表示每个物理量并进行计算，以及如何利用一些基本元件构成一个基本电路。

本章还将介绍一些产生电压和电流的器件类型。此外，还介绍了将电阻引入电路的各种各样的元件，例如保护器件操作的保险丝和断路器，以及电路中经常用到的机械开关装置，等等。同时，读者还将学到如何运用测量仪器控制和测量电压、电流以及电阻。

电压在电子电路中是一个很重要的量，它是电路中电荷所必须具有的势能。电流在电路中也是很重要的，电流的产生离不开电压。电子在回路中的定向移动形成电流。电阻是在回路中限制电流的元件。我们可以用自来水系统来模拟一个简单的回路。可以认为电压是迫使水流通过管道的压力。电流可以看成在管道中移动的水流，而电阻则可以看做调节阀门对水流大小施加的限制。

技术实践

在本章末尾的技术实践部分中，以一个汽车车灯系统为例，介绍了如何利用本章所学的理论来分析一个实际电路。当我们合上车头灯和车尾灯的开关时，就将灯泡和电池接通了。为灯泡提供了电压，并产生了通过灯泡的电流，而电流使灯泡发光。灯泡本身具有电阻，会限制所流过电流的大小。大多数车辆仪表盘上的灯是可以调节亮度的，转动调节旋钮时，实际上改变的是电路中的电阻，进而造成回路中电流的改变。而通过灯泡的电流决定了灯光的亮度。

本章目标

- 描述原子的基本结构
- 解释电荷的概念
- 定义电压并探讨其特性
- 定义电流并探讨其特性
- 定义电阻并探讨其特性
- 描述一个基本电路
- 掌握基本电路测量法
- 认识电灾害并对适当的安全程序进行实验

主要术语

- 原子
- 电子
- 自由电子
- 导体

- 半导体
- 绝缘体
- 电荷
- 库仑
- 电压
- 伏特
- 电流
- 安培
- 电阻
- 欧姆
- 电导
- 西门子
- 电位器
- 变阻器
- 电路
- 负载
- 闭合电路
- 开路
- 美国导线规格(AWG)
- 接地
- 伏特表
- 安培表
- 欧姆表
- 万用表
- 电击

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料,请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

2.1　原子结构

一切物质都是由原子构成的,而所有的原子都是由电子、质子和中子构成的。本节将介绍原子的结构,电子轨道,电子层,以及价电子、离子和应用于电子学中的物质类型。像硅和锗这类半导体材料是非常重要的,因为原子中的某些电子构造是决定一种特定材料如何产生电流的关键因素。

学习完本节内容后,读者应该能够:

- 描述原子的基本结构
- 阐述原子核、质子、中子和电子的定义
- 阐述原子序数的定义
- 阐述电子层的定义
- 解释什么是价电子
- 描述电离
- 解释什么是自由电子
- 阐述导体、半导体和绝缘体的定义

原子是一个元素中体现元素特性的最小单元。在已知的109种元素中,其内部的原子结构是各不相同的。每个元素都具有惟一的原子结构。根据经典的波尔模型,可以将原子结构想像成一个行星结构,由原子核及沿轨道绕核运转的电子组成,如图2.1所示。原子核由带正电荷的质子和不带电的中子组成。带负电荷的粒子称为电子。

每一种原子都有确定的电子数和质子数,并以此与其他元素的原子相区分。以结构最简单的氢原子为例,氢原子含有一个质子和一个电子,如图2.2(a)所示。再以氦原子为例,如图2.2(b)所示,其原子核内含有两个质子和两个中子,核外有两个电子。

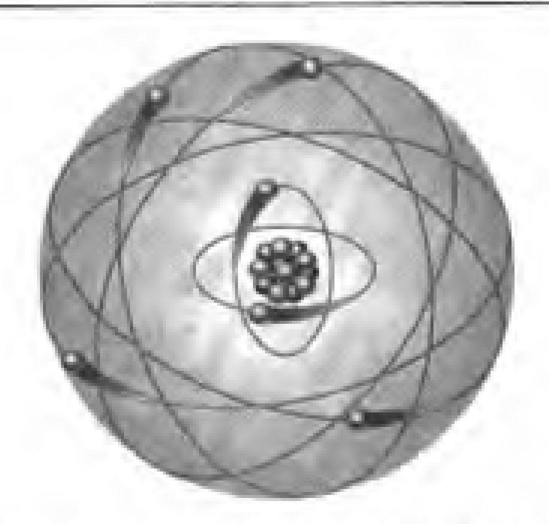
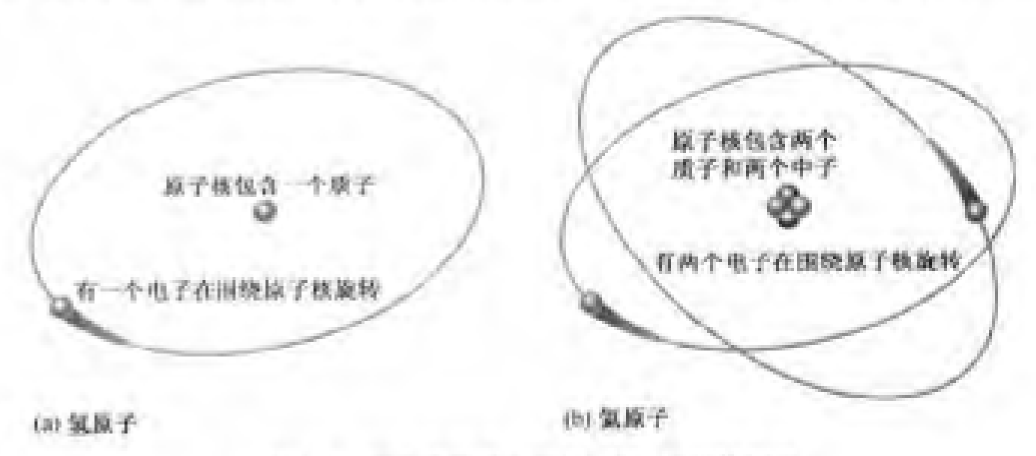


图 2.1 波尔的原子模型显示了电子绕核旋转的轨迹。图中电子所拖的"长尾"说明电子正在旋转



(a) 氢原子　　(b) 氦原子

图 2.2 两个最简单的原子：氢原子和氦原子

2.1.1 原子序数

在元素周期表中所有的元素均按其原子序数依次排列。原子序数等于原子核内的质子数。举例来说，氢的原子序数为 1，而氦的原子序数为 2。在处于常规(中性)状态时，所有已知元素原子的电子数与质子数都是相同的。正负电荷相互抵消，原子所带净电荷数为零，使其达到电平衡。

2.1.2 电子层和轨迹

原子中核外电子绕核旋转，其电子轨道与原子核有一定的距离。运行轨道离核近的电子能量要少于运行轨道远一些的电子能量。由于在原子结构中电子运行的轨道能量值是不连续的，因此电子到原子核的距离也是不连续的。

能级 每一个轨道到原子核的距离都对应着确定的能级。在一个原子中，由轨道群所构成的能量带称为电子层。每个原子的电子层数目都是固定的。在允许的能级(轨道)范围内每一个电子层都有固定的最大电子数。一个电子层中的能量差别要远远小于电子层间的能量差别。在电子层中离原子核最近的为第 1 层，稍远一些的为第 2 层，依次类推。能带的概念说明参见图 2.3，图中第 1 电子层对应一个能级，第 2 电子层对应两个能级。其他原子可能有更多的电子层，这由元素决定。

2.1.3 价电子

相对于距离原子核较近的电子来说，电子的运动轨迹距离原子核越远，所具有的能量就越高，原子核对其的束缚力就越小。这是因为随着与原子核距离的增加，带正电的原子核与带负电的电子之间的吸引力会逐渐减小。具有最高能级的电子存在于一个原子的最外电子层中，原子核几乎已经丧失了对它的束缚力。这个最外层的电子层称为价电子层，而这个电子层中的电子称为价电子。正是由于价电子的存在，化学反应才成为可能。价电子由和各种物质的结构紧密相关，同时决定了物质的电特性。

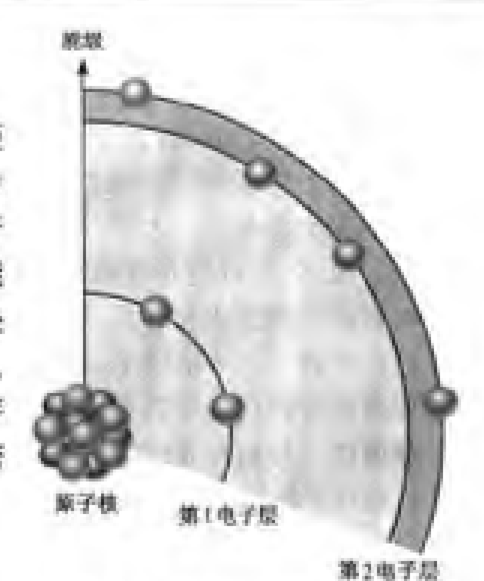


图2.3　随着与原子核距离的增加，能级相应上升

2.1.4 电离

当一个原子从一个热源或光源中吸收能量时，电子的能级是可以提升的。当价电子拥有更多的能量时，相对于内部电子，原子核对它的束缚力就变弱了。因此，持续吸收外部能量时，这些价电子就可以很轻易地向价电子层中的更高能级轨道跃迁。

如果一个价电子可以获得足够的能量，则完全可以脱离外层电子层以及原子核的影响。当价电子完全脱离后，原来的中性原子转为携带正电荷(质子多于电子)。这个过程称为电离，而失去价电子之后带正电荷的原子称为阳离子。例如，氢的化学符号是H，一个中性氢原子失去了价电子后就变成一个阳离子，记为H^+。脱离束缚的价电子称为自由电子。当一个自由电子失去能量并进入到中性氢原子的外层电子层时，原子转变为带负电荷(电子多于质子)。此时称之为阴离子，记为H^-。

2.1.5 铜原子

由于铜是电应用中常用到的金属，所以我们现在来讨论其原子结构。铜原子含有29个电子，核外电子层的分布为4层，每一个电子层中所含的电子数目可以根据公式$2N^2$(其中N是电子层的序数)计算，由此可以算出第1电子层所含电子数为2，第2层为8，第3层为18，而第4层则含有32个电子。

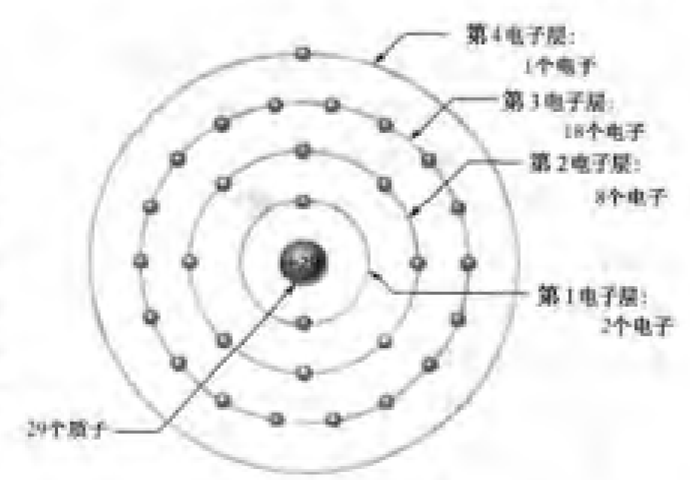


图2.4　铜原子

图2.4所示为一个铜原子。从图中可以看到，第4层，也就是最外层电子层(价电子层)只有1个价电子。当铜原子的最外层价电子获得足够的能量，脱离原有原子的束缚后，就变为一个自由电子。比如在室温下的一块铜中，就有大量这种自由电子。这些电子脱离了既定原子的束缚，可以在铜这种物质中自由移动。正是这些自由电子使得铜具备了非常强的导电能力。

2.1.6 物质的分类

在电子学中,物质分为三类:导体、半导体和绝缘体。

导体 电流能够轻易通过的物质称为导体。导体含有大量自由电子,在其原子结构中一般含有1到3个价电子。大部分金属都是很好的导体。银是最好的导体,铜次之。不过由于铜比银要便宜很多,所以铜是应用最广泛的导体材料。电路中常用到铜丝制成的导线。

半导体 由于半导体所含的自由电子少于导体,所以其导电能力弱于导体。半导体物质的原子结构中含有4个价电子。正是由于这一性质,可靠的半导体材料成为了构成二极管、晶体管和集成电路等现代电子器件的基本成分。硅和锗是常用的半导体材料。

绝缘体 导电性能极差的物质称为绝缘体。实际上,在不希望有电流通过的地方常常用到绝缘体。相对于导体,绝缘体只有很少的自由电子,其原子结构中的价电子的数目必定大于4。

2.1节练习(答案在本章末尾)

1. 带负电荷的基本粒子是什么?
2. 原子的定义。
3. 一个典型原子由哪几部分组成?
4. 原子序数的定义。
5. 是不是所有的元素都具有相同类型的原子?
6. 什么是自由电子?
7. 在原子结构中,什么是电子层?
8. 列出两种导体物质的名称。

2.2 电荷

学习完上一节的内容后,可以发现有两种类型的电荷,一种是正电荷,另一种是负电荷。电子是带有负电荷的最小微粒。当一种物质中含有过量电子时,就存在净负电荷。当一种物质中的电子少于质子时,就存在净正电荷。

完成本节的学习后,读者应该能够:

- 解释电荷的概念
- 了解电荷的单位
- 了解电荷的类型
- 阐述吸引力和排斥力的概念
- 已知电子数确定电荷数

一个原子中的电子和质子所带的电荷在数量上是相等的。电荷是电子和质子的最基本特性,符号是 Q。静电是由于物质中存在净正电荷或净负电荷而产生的。每个人都会有接触到静电的经验。例如,当尝试碰触一个金属表面、另一个人,或者干洗后的衣物时,就可能感觉到静电。

如图2.5所示,带有异种电荷的物质会相互吸引,而带有同种电荷的物质会相互排斥。在电荷间存在着显著的排斥力和吸引力,这就是电场。电场是看不见、摸不着的,如图2.6所示。

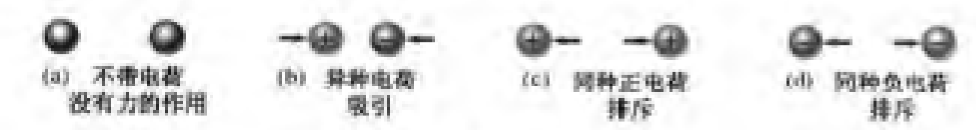


图2.5 电荷的吸引和排斥

2.2.1 库仑:电荷的单位

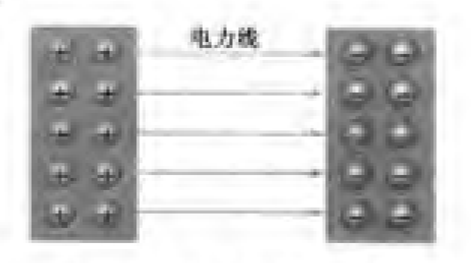


图2.6 异种电荷外围的电场

电荷(Q)的单位是库仑,符号是C。

6.25×10^{18}个电子所带的电荷总数是1库仑。

单个电子所带的电荷数为1.6×10^{-19}C。用Q表示总电荷,对于给定的电子数目,其计算公式如下:

$$Q=\frac{电子数}{6.25\times10^{18}电子/C} \tag{2.1}$$

2.2.2 正电荷和负电荷

就一个中性原子而言,其电子数和质子数相同,所以没有净电荷。当一个价电子吸收能量脱离原子的束缚后,原子就带有一个净正电荷(质子数多于电子数)而变成一个正离子。反之,当一个原子的外层电子层中获得了一个额外电子时,原子就带有一个净负电荷,因而变成一个负离子。

价电子脱离原子的束缚所需要的能量与该原子的外层电子层中的电子数目有关。一个原子最多可以有8个价电子。外层电子层中的电子数目越多,该原子结构就越稳定,而电子要想脱离原子束缚就需要更多的能量。图2.7说明了正离子和负离子的产生过程。当一个氢原子放弃了一个价电子后,让其与氯原子结合,就产生了氯化氢气体(HCl)。氯化氢气体溶解于水后就是盐酸。

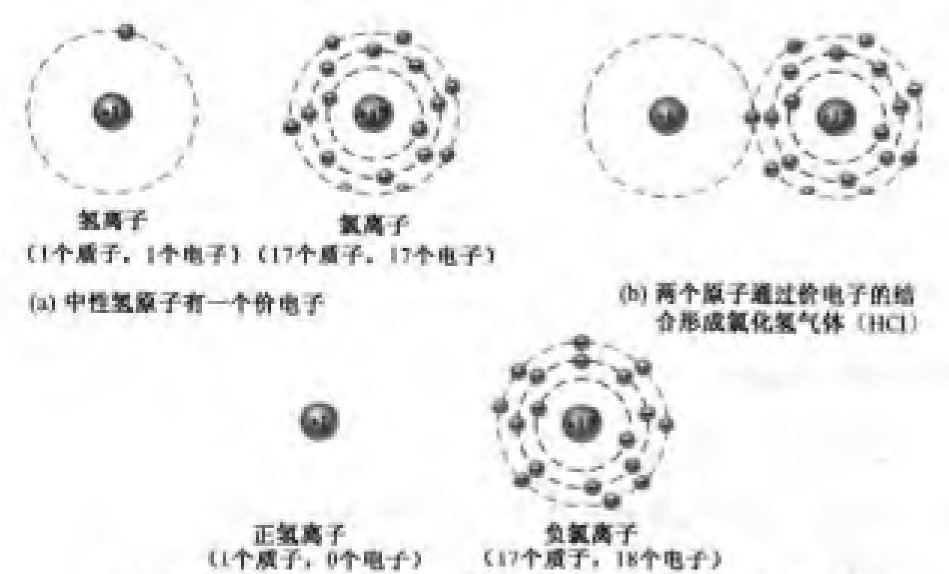


图2.7 阳离子和阴离子形成示例

例 2.1 93.8×10^16 个电子所带的电荷是多少?

解:

$$Q = \frac{\text{电子数}}{6.25\times10^{18}\text{电子/C}} = \frac{93.8\times10^{16}}{6.25\times10^{18}/\text{C}} = 15\times10^{-2}\,\text{C} = \mathbf{0.15\ C}$$

练习:电荷总数为 3 C 的电子数目为多少?

2.2 节练习

1. 电荷的符号是什么?
2. 电荷的单位是什么? 该单位的符号是什么?
3. 正电荷和负电荷产生的原因是什么?
4. 10×10^{12}个电子所带的电荷为多少库仑?

2.3 电压

如我们所知,正负电荷间存在着吸引力。如果要将正负电荷分开,需要克服二者之间的吸引力,这就意味着需要消耗巨大的能量。所有的异类电荷由于彼此间的距离而具有一定的势能,每个电荷所具有的势能差就是电势差或电压。电压在电路中是一种推动力,能产生电流。

完成本节的学习后,读者应该能够:

- 定义电压并论述其性质
- 阐述电压的公式
- 了解电压的单位
- 描述基本电压源

假设在地上用支架架起一个水槽,利用已有能量将该水槽注满水。当水储存在水槽中时,就具备了一定的势能;如果释放,就可以完成一定的工作。例如,水从槽中流出后可以推动水车转动。

电荷的电势差在电学名词中称为电压,符号为 V。电压定义为单位电荷(Q)所消耗的能量或所做的功(W)。

$$V = \frac{W}{Q} \tag{2.2}$$

功的单位为焦耳(J),电荷的单位为库仑(C)。

2.3.1 伏特:电压的单位

电压的单位是伏特,符号为 V。

若在某两点间每通过 1 库仑的电荷时,所消耗的能量为 1 焦耳,则这两点间的电势差(电压)为 1 伏特。

例 2.2 如果移动 10 C 的电荷需要消耗 50 J 的能量,求电压是多少?

解:

$$V = \frac{W}{Q} = \frac{50\ \text{J}}{10\ \text{C}} = \mathbf{5\ V}$$

练习:当两点间的电压为 12 V 时,要移动 50 C 的电荷所消耗的能量是多少?

2.3.2　电压源

电池　一种可以提供电能或电动势的电压源。它也是一种将化学能转换为电能的电压源。一个电池由四个基本部分构成：正电极、负电极、电解液和一个可渗透的分离器。正电极由于化学反应造成电子缺乏，负电极由于化学反应造成电子过剩，电解质为电荷在正负电极间移动提供了条件，而分离器电隔离了正负电极。电池的工作原理如图2.8所示。

电池的电压由其内部材料决定，两个电极处发生的化学反应为其各自提供了一定的电势能。例如，一个铅－酸电池，在正电极处产生－1.685 V的势能，在负电极处产生＋0.365 V的势能，这就意味着该电池在两个电极间的电压为2.05 V。这是标准铅－酸电池的电动势，酸浓度等因素会影响这个数值的大小，所以通常商用铅－酸电池的电动势为2.15 V。任意电池的电压都是通过化学反应产生的。镍－镉电池通常有1.2 V，而锂电池最高可以达到4 V。

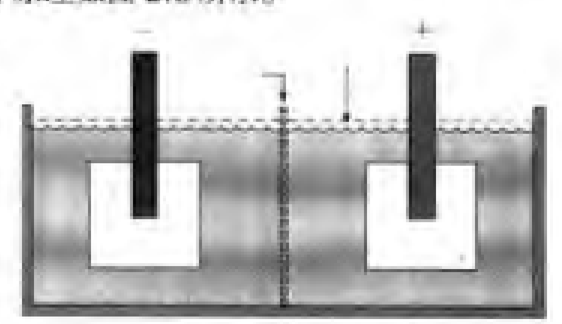


图2.8　电池的工作原理图

尽管根据化学性质，电池的电压是固定的，但其容量是可变的，这取决于电池内反应物质数量的多少。本质上，电池的容量是指从中能够获得的电子总数，是通过测量使用期间所提供的电流（在2.4节定义）总量来确定的。

电池组通常是由相同的电池通过内部连接起来的。这种连接方式和电池的类型决定了电池组的电压和容量。如果一个电池的正极与另一个电池的负极相连，依次类推，如图2.9(a)所示，则电池组的电压就是所有单个电池电压的总和，这称为串联。而为了提升电池组的容量，几个电池的正负极各自连在一起；如果连接方法如图2.9(b)所示，就称为并联。这种电池相当于内部进行反应的物质量增加，其供给电流的能力也增加了，但对其电压是没有影响的。


(a) 串联　　(b) 并联

图2.9　电池连接形成电池组

电池可以分为两大类，一次性的和充电的。一次性电池如名称所示，是一次性使用的，这是因为其内部进行的化学反应是不可逆的。充电电池是可以重复使用的，由于其内部进行的化学反应是可逆的，所以可以再次充电。关于电池的进一步讨论请参见附录B。

太阳能电池　太阳能电池是利用光电作用将光能直接转化为电能来工作的，是由两层不同类型的半导体材料接合而形成的。当一层的半导体材料受到光照时，其内部的很多电子由于获得了足够的能量而脱离了原先所在原子的束缚，穿过两层间的交汇处进入到另一层。这一过程使得正负离子分别处于交汇处的两端，进而产生电势差（电压）。图2.10描述了这一过程。

发电机　发电机可以利用电磁感应原理（参见第10章）将机械能转换为电能。一个导体在磁场中旋转，进而产生电压。图2.11所示是一种典型的发电机。

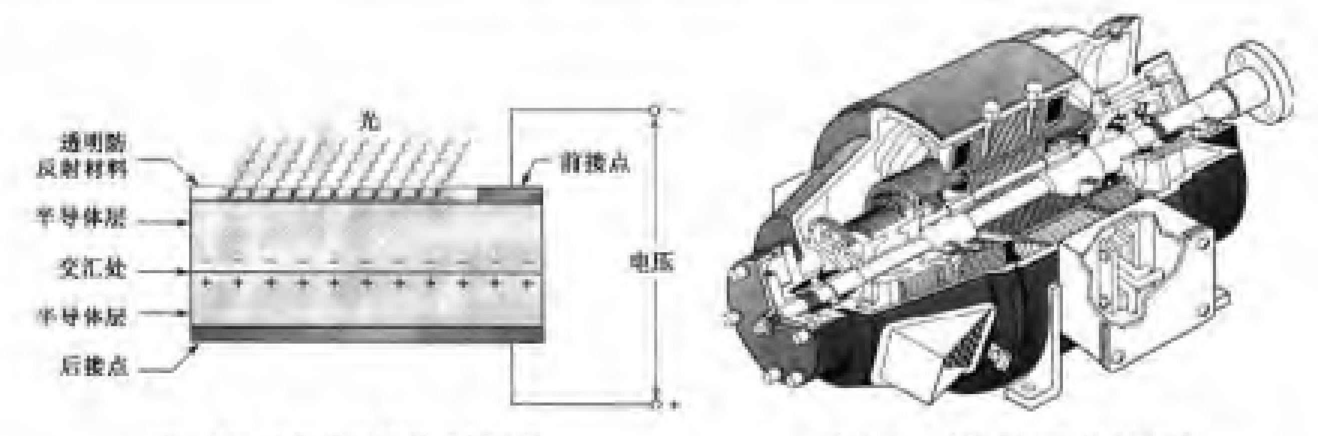


图 2.10　太阳能电池的工作原理　　　图 2.11　直流发电机的剖面图

电子电源　电源并不是将其他形式的能量转换成电能，而仅仅是通过两个接头将从电源插座所引出的交流电转换为直流(DC)电压，参见图 2.12(a)。图 2.12(b)给出了两种常用电源的实物图。



图 2.12　电子电源(使用本图片经 B&K Precision Corp. 许可)

2.3 节练习

1. 阐述电压的定义。
2. 电压的单位是什么？
3. 移动 10 C 的电荷需要消耗 24 J 的能量，求电压是多少？
4. 列出四种电压源。

2.4　电流

电压为电子提供了在电路中移动的能量，这种电子的移动形成电流。

完成本节的学习后，读者应该能够：

- 定义电流并论述其性质
- 解释电子的移动
- 阐述电流的公式
- 说出电流的单位并阐述其定义

前面我们已经提到，自由电子存在于所有的导体和半导体中，这些自由电子从一个原子到另一个原子无目的地向各个方向运动，如图2.13所示。

如果将一个电压加在一个导体或半导体的两端，右端为正极，左端为负极，如图2.14所示。由于排斥力的作用，内部的自由电子(负电荷)受到左端负电压的排斥作用，向右端运动。同时，内部的自由电子又受到右端正电压的吸引作用而同样向右端运动。最终，使自由电子从导体或半导体的负极一端向正极一端做定向运动，过程如图2.14所示。



图2.13　自由电子在物质中做不定向运动

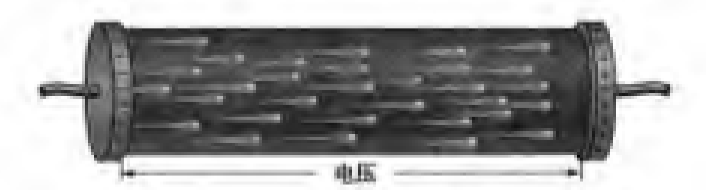


图2.14　当在导体或半导体两端加一个电压时，自由电子从负极向正极运动

物质中自由电子从负极到正极所做的定向运动形成电流，符号为 I。

电流是电荷移动的速率。

电流是单位时间内通过导体任一截面的电子量(电荷的总数 Q)。

$$I=\frac{Q}{t} \tag{2.3}$$

电流 I 的单位是安培，电子所带电荷总数 Q 的单位是库仑，时间 t 的单位是秒。

2.4.1　安培：电流的单位

电流的单位是安培，缩写为安，符号为A。

若在1秒(1 s)内通过导体横截面的电子所带的电荷总数为1库仑(1 C)，则导体中的电流量为1安培(1 A)。

参见图2.15，注意1库仑是 6.25×10^{18} 个电子所带的电荷总数。

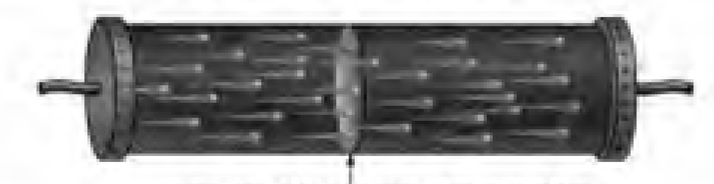


图2.15　说明物质中1 A的电流(1 C/s)

例2.3　在2 s内通过一根导线截面的电子所带的电荷总数为10库仑，求其电流为多少安培？

解：

$$I=\frac{Q}{t}=\frac{10\ \text{C}}{2\ \text{s}}=5\ \text{A}$$

练习：如果流过灯泡灯丝的电流为8 A，则在1.5 s内通过灯丝的电荷总数是多少？

2.4节练习

1. 阐述电流的定义及其单位。

2. 多少电子所带的电荷总数为 1 库仑?

3. 在 4 s 内通过导线一点的电荷总数为 20 C,求其流过的电流为多少安培?

2.5 电阻

自由电子在导体中做定向运动形成电流。这些自由电子运动时与原子发生碰撞,导致其失去了部分能量,进而运动受阻。越多的碰撞,对电子运动的阻碍就越大,这种阻碍的大小是由该物质的类型决定的。阻碍电子运动的物质的性质称为电阻。

完成本节的学习后,读者应该能够:

- 阐述电阻的定义及其性质
- 了解电阻的单位
- 描述电阻的类型
- 通过色环和标称值识别电阻

电阻阻碍电流的流动。

电阻的示意符号如图 2.16 所示。

电流通过任何物质时都会有电阻存在。自由电子和原子的碰撞会产生热,因此,足够大的电流通过导线这种常见的小电阻物质,会使其变得很热。

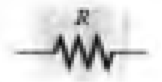


图 2.16 电阻/电阻器符号

2.5.1 欧姆:电阻的单位

电阻的符号为 R,单位是欧姆,用希腊字母 Ω 来表示。

当电阻两端的电压是 1 伏特(1 V),通过的电流为 1 安培(1 A)时,该电阻的阻值为 1 欧姆(1 Ω)。

电导 电阻的倒数就是电导,符号是 G。电导表示允许电流通过的能力,公式是:

$$G = \frac{1}{R} \tag{2.4}$$

电导的单位是西门子,符号为 S。例如,一个 22 kΩ 的电阻器的电导为 $G = 1/22\ \text{k}\Omega = 45.5\ \mu S$。有时候也可能会用到旧的电导单位姆欧(mho)。

2.5.2 电阻器

物体对电流的阻碍作用称为电阻,利用这种阻碍性质的元件称为电阻器。电阻器最主要的应用是限流和分压,并在某些情况下产生热能。尽管电阻器在形状和大小方面有很多不同的类型,但总的来说可以分为两大类:定值电阻器和可变电阻器。

定值电阻器 定值电阻器是由工厂成批加工制成,阻值无法变更的电阻器。它提供的固定阻值范围很广。定值电阻器由各种方法和材料制成,其典型实物的外形如图 2.17 所示。

一种常用的定值电阻器是由碳材料制成的,具体来说是由粉碎的碳黑等导电材料以及一些绝缘填充物混合加入树脂粘合剂压制而成的。其中碳和绝缘填充物的比值决定了电阻器的阻值。上述混合物压制成一个条状体,由导电的石墨连接制成。整个电阻封装在一个绝缘的保护层中,其典型实物的构造如图 2.18(a)所示。

另外一种定值电阻器是贴片式电阻。这是一种表面安装工艺(SMT,surface mount technology)元件,由于体积很小而非常适合密集装配,图 2.18(b)是其构造图。

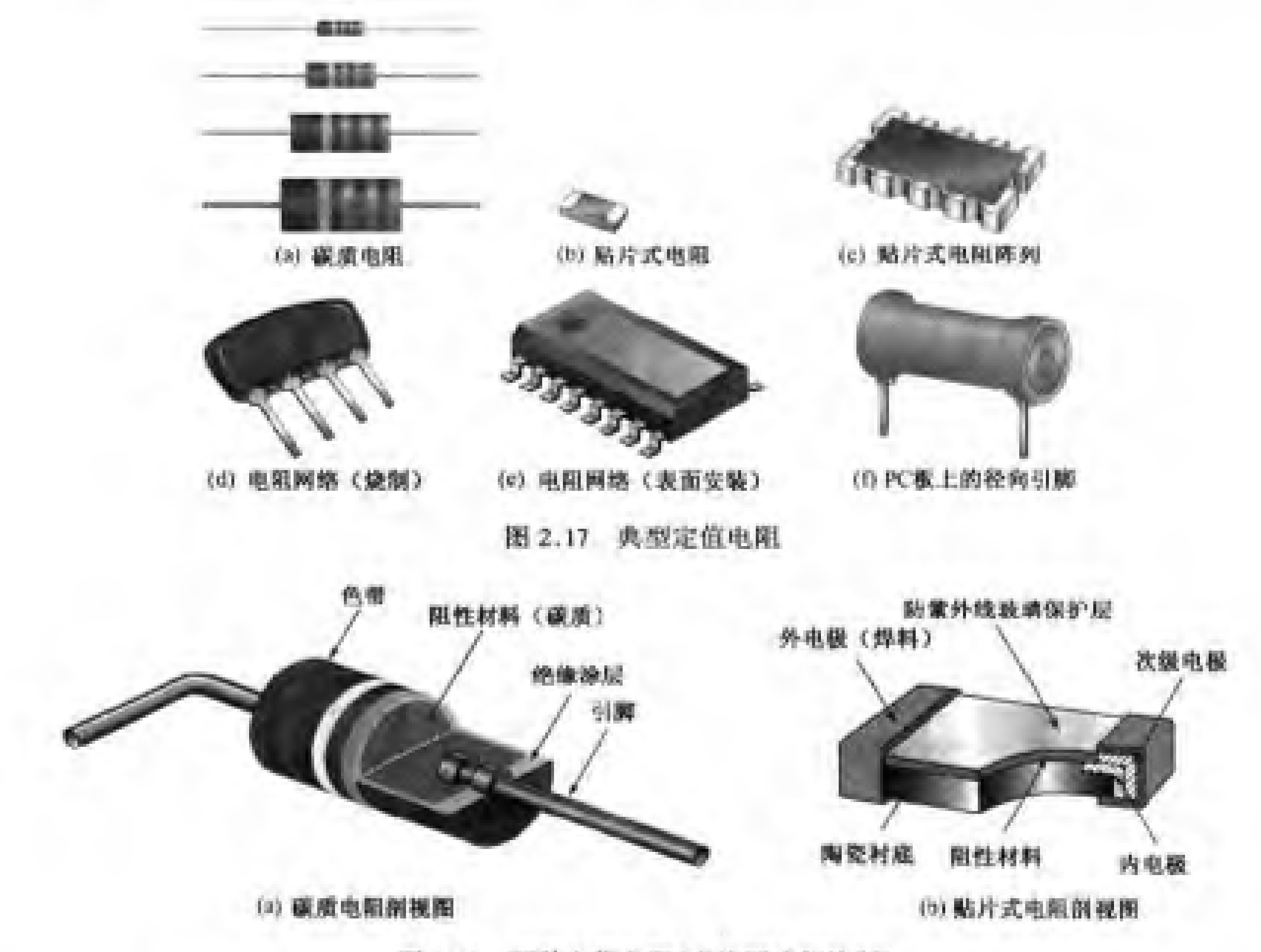


图 2.17 典型定值电阻

图 2.18 两种定值电阻(未按照比例绘制)

其他一些定值电阻包括碳膜电阻、金属膜电阻和线绕电阻。在薄膜电阻中,有一种是在高级陶瓷棒上镀了一层阻性材料制成的,这种阻性材料可能是碳(碳膜)也可能是镍铬(金属膜)。在这类电阻中,可以通过一种螺旋工艺沿着棒体切除部分阻性材料形成螺纹状来设定阻值,如图 2.19(a)所示。使用这种方式偏差会比较低。薄膜电阻也可以用于构成电阻网络,如图 2.19(b)所示。

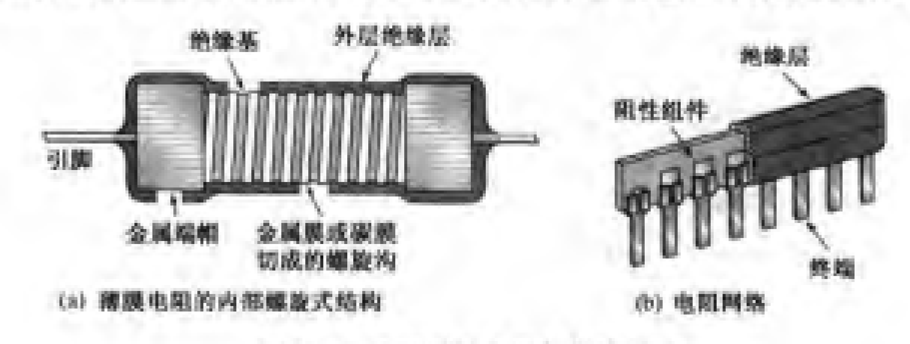


图 2.19 典型薄膜电阻的结构视图

线绕电阻是由电阻丝绕在绝缘棒上然后再密封制成的。线绕电阻一般用于需要较高额定功率的电路中。图 2.20 列出了一些典型的线绕电阻。



图 2.20　典型的线绕电阻

电阻色环　允许偏差为 5% 或 10% 的定值电阻用四条色环来表示其阻值和允许的偏差。这种利用色环标记的方式如图 2.21 所示，表 2.1 列出了色环所对应的数值和含义。这些色环总是在靠近电阻的一端。

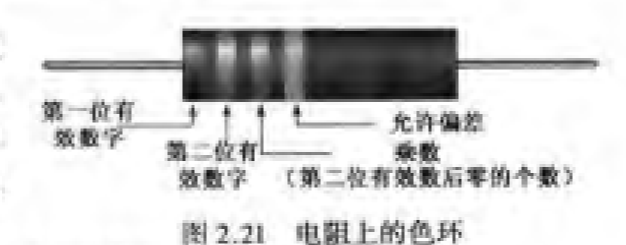


图 2.21　电阻上的色环

表 2.1　电阻的色环对照表

	有效数字	色环颜色	
电阻阻值，前三道色环： 第一道　第一位有效数字 第二道　第二位有效数字 *第三道　乘数（第二位有效数字后0的个数）	0		黑
	1		棕
	2		红
	3		橙
	4		黄
	5		绿
	6		蓝
	7		紫
	8		灰
	9		白
第四道　允许偏差	±5%		金
	±10%		银

* 如果电阻阻值小于 10 Ω，第三道色环也是金色或银色。金色表示乘以 0.1，银色表示乘以 0.01

色环的解读如下：

1. 以最靠近电阻一端的色环作为起始色环，第一道色环是电阻阻值的第一位有效数字。如果无法分清哪一个是起始色环，就从不是以金色或银色开头的那端读起。
2. 第二道色环代表电阻阻值的第二位有效数字。
3. 第三道色环代表第二位有效数字后面零的个数，也就是乘数。
4. 第四道色环代表允许的偏差，通常用金色或银色表示。

例如，允许偏差为 5% 意味着实际阻值与色环标记值的偏差在 ±5% 以内。因此，一个允许偏差为 ±5% 的 100 Ω 电阻，其实际阻值最低不能小于 95 Ω，最高不能超过 105 Ω。

如果电阻阻值小于 10 Ω,第三道色环也是金色或银色。金色表示乘数为 0.1,银色表示乘数为 0.01。例如,一个色环分别为红、紫、金和银色的电阻所代表的阻值为 2.7 Ω,允许偏差为 ±10%。标准阻值列表参见附录 A。

例 2.4　列出图 2.22 中电阻的阻值及允许偏差。

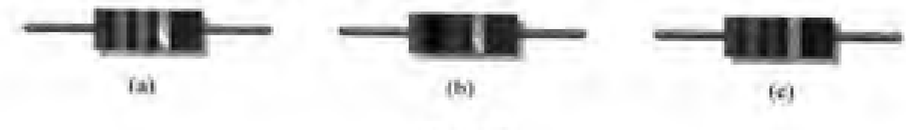


图 2.22

解:(a) 第一道色环为红色 = 2,第二道色环为紫色 = 7,第三道色环为橙色 = 3 个 0,第四道色环为银色 = 10% 的偏差。

$$R = 27\ 000\ \Omega \pm 10\%$$

(b) 第一道色环为棕色 = 1,第二道色环为黑色 = 0,第三道色环为棕色 = 1 个 0,第四道色环为银色 = 10% 的偏差。

$$R = 100\ \Omega \pm 10\%$$

(c) 第一道色环为绿色 = 5,第二道色环为蓝色 = 6,第三道色环为绿色 = 5 个 0,第四道色环为金色 = 5% 的偏差。

$$R = 5\ 600\ 000\ \Omega \pm 5\%$$

练习:一个电阻的第一道色环为黄色,第二道色环为紫色,第三道色环为红色,第四道色环为金色,求其阻值及允许偏差。

五道色环　允许偏差为 2%,1% 或更小的电阻,其阻值用五道色环来表示,如图 2.23 所示。同样以最靠近电阻端部的色环作为起始色环,第一道色环代表电阻阻值的第一位有效数字,第二道色环代表电阻阻值的第二位有效数字,第三道色环代表电阻阻值的第三位有效数字,第四道色环是乘数(第三位有效数字后 0 的个数),第五道色环代表允许偏差。表 2.2 列出了色环所对应的数值和含义。



图 2.23　五道色环的电阻

表 2.2　五道色环电阻的色环对照表

	有效数字	色环颜色
	0	黑
	1	棕
电阻阻值,前三道色环:	2	红
第一道——第一位有效数字	3	橙
第二道——第二位有效数字	4	黄
第三道——第三位有效数字	5	绿
第四道——乘数(第三位有效数字后 0 的个数)	6	蓝
	7	紫
	8	灰
	9	白
第四道——乘数	0.1	金
	0.01	银

(续表)

	有效数字	色环颜色
第五道——允许偏差	±2%	红
	±1%	棕
	±0.5%	绿
	±0.25%	蓝
	±0.1%	紫

电阻的可靠性色环　在一些色环电阻上有一道额外的色环用于指示这类电阻的可靠性，即该类电阻每使用1000小时的损耗率。表2.3列出了这道可靠性色环所对应的数值和含义。例如，一个四道色环的电阻，其第五道色环为棕色，这意味着一组这种电阻在正常条件下使用1000小时，其损坏率为1%。

表2.3　可靠性色环

颜色	每使用1000 h的损坏率
棕	1.0%
红	0.1%
橙	0.01%
黄	0.001%

例2.5　列出图2.24中的电阻阻值及允许偏差。



图2.24

解：(a) 第一道色环为红色=2，第二道色环为紫色=7，第三道色环为黑色=0，第四道色环为金色=×0.1，第五道色环为红色=±2%的偏差。

$$R=270\times 0.1=\mathbf{27\ \Omega\pm 2\%}$$

(b) 第一道色环为黄色=4，第二道色环为黑色=0，第三道色环为红色=2，第四道色环为黑色=0，第五道色环为棕色=±1%的偏差。

$$R=\mathbf{402\ \Omega\pm 1\%}$$

(c) 第一道色环为橙色=3，第二道色环为橙色=3，第三道色环为红色=2，第四道色环为橙色=3，第五道色环为绿色=±0.5%的偏差。

$$R=\mathbf{332\ 000\ \Omega\pm 0.5\%}$$

练习：一个电阻的第一道色环为黄色，第二道色环为紫色，第三道色环为绿色，第四道色环为金色，第五道色环为红色，求其阻值及允许偏差。

2.5.3　电阻的标称值

并不是所有的电阻阻值都用色环来表示。很多电阻，像表面安装电阻等，都是将阻值和允许偏差直接用数字表示并印在电阻上。这种标称值通常是由各种数字(数字式)或字母及数字相结合的方式(字母数字式)表示的。如果电阻表面空间足够大，整个电阻的阻值及允许偏差就可以标准形式印到电阻上面。

数字式标记法 这种类型的标记方法是用三个有效数字来表示电阻的阻值，图2.25显示了一个特例。前两个数字给出了该电阻阻值的前两位有效数字，第三个数字给出了乘数或前两位有效数字之后0的个数。这种标记法一般用于阻值大于或等于10 Ω的电阻。



图2.25 数字式标记法

字母数字式标记法 另外一种通用方法是用三到四位字母或数字来标记电阻的阻值。这种方法一般由三个数字或两到三个数字加一个字母R、K或M来表示电阻阻值。其中，字母用来表示乘数，而字母所在的位置用来表示小数点的位置。字母R表示乘数为1(有效数字后没有0)，K表示乘数为1000(有效数字后有3个0)，而M表示乘数为1 000 000(有效数字后有6个0)。在这种形式下，标记阻值为三位数即阻值范围为100到999的电阻只需要用三个数字直接表示，不需要再加字母。图2.26列出了这种标记法的三个例子。

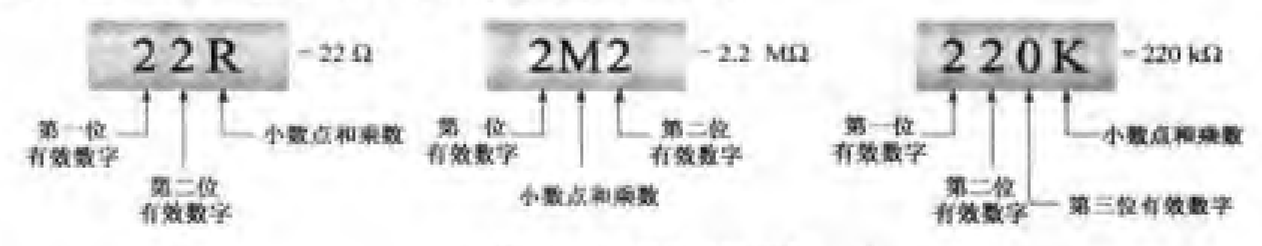


图2.26 字母数字式标记法

例2.6 列出下列字母数字式标记法所对应的电阻阻值：

(a) 470 (b) 5R6 (c) 68K (d) 10M (e) 3M3

解： (a) 470 = **470 Ω** (b) 5R6 = **5.6 Ω** (c) 68K = **68 kΩ**

(d) 10M = **10 MΩ** (e) 3M3 = **3.3 MΩ**

练习： 问1K25所对应的阻值为多少？

上述标记法中允许偏差用字母F、G和J来表示，这些字母对应的允许偏差数值如下：

$$F = \pm 1\% \qquad G = \pm 2\% \qquad J = \pm 5\%$$

例如，620F表示电阻的阻值为620 Ω，其允许误差为±1%；4R6G代表4.6 Ω±2%的电阻；而56KJ表示56 kΩ±5%的电阻。

可变电阻器 通过人为或自动调节，可变电阻器的阻值可以很容易地改变。

可变电阻器在电路中的两种基本应用是分压和控制电流。可变电阻器起分压作用时可以称为电位器，将其用于控制电路电流时称为变阻器。图2.27列出了这几种类型的示意符号。电位器有三个引出端，如图2.27(a)所示。1端和2端之间的阻值是固定的，也就是该电阻的最大阻值。3端连接一个滑动触点（电位器游标），通过向上或向下改变触点的位置，从而可以改变3点到1点或3点到2点间的电阻阻值。

图2.27(b)为变阻器作为具有两个引出端的可变电阻的示意图。图2.27(c)显示了通过将3端与1端或2端相连而将一个电位器变成一个变阻器的示意图。图2.27(b)和图2.27(c)的符号是等价的。图2.27(d)显示了一个电位器（也可以作为变阻器）的基本结构。图2.28列出了一些电位器的典型实物图。

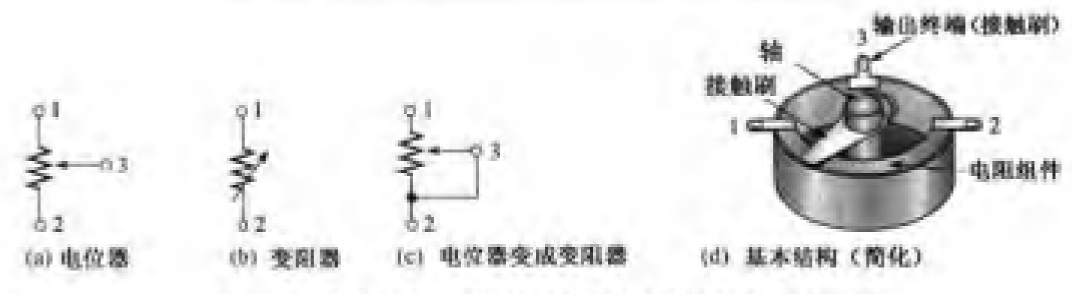


图 2.27　电位器和变阻器的符号以及电位器的基本结构



图 2.28　典型的电位器和两种电位器的截面图

电位器和变阻器可以分为线性和非线性两类。如图 2.29 所示，以总阻值为 100 Ω 的电位器为例，图 2.29(a)中的一个线性电位器随着滑动触点的移动，其触点与电阻另两端间的电阻阻值呈线性变化。例如，当触点移动到两端点正中的位置时，与两端点间的阻值都为总阻值的一半。当触点从电位器一端向另一端移动总距离的3/4 时，与初始端之间的阻值变为总阻值的 3/4，与另一端之间的阻值为总阻值的 1/4。

随着滑动触点的移动，一个非线性电位器的阻值是呈非线性变化的。所以当滑动触点移动到两端点正中的位置时，与两端点间的阻值不一定是总阻值的一半，图 2.29(b)说明了这种情况。

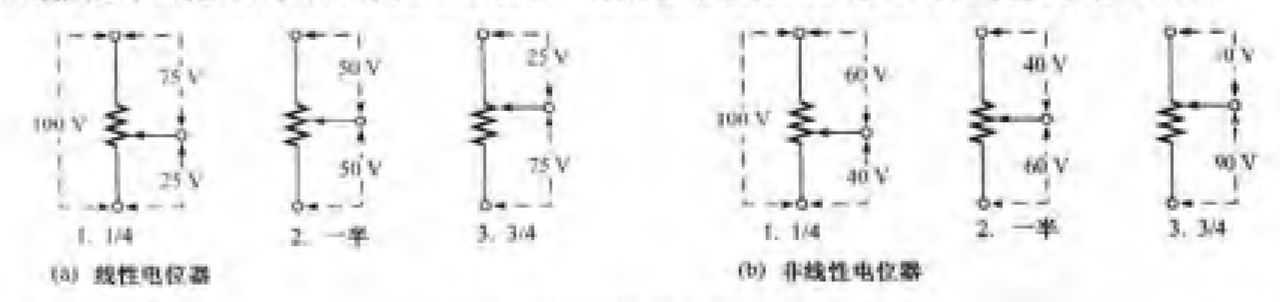


图 2.29　线性电位器和非线性电位器

电位器常用做电压控制器件。这是因为当一个固定电压加在电位器的两端时，其滑动触点相对于两端点所获得的电压是可变的。变阻器常用做电流控制器件，这是因为当改变滑动触点的位置时，流过的电流也会发生相应的变化。

两类自动变值电阻器　热敏电阻是一种对温度很敏感的可变电阻器。当温度系数为负值时，其阻值与温度的变化成反比；当温度系数为正值时，其阻值与温度的变化成正比。

光敏电阻的阻值随着光照强度的改变而改变，其温度系数为负值。上述两种器件的示意符号如图 2.30 所示。



图 2.30　热敏电阻和光敏电阻的表示符号

2.5 节练习

1. 阐述电阻的定义及其单位。
2. 两类重要的电阻是什么？简要叙述出它们的区别。
3. 在四道色环电阻中，每道色环的含义是什么？
4. 列出图 2.31 中电阻的阻值和允许偏差。

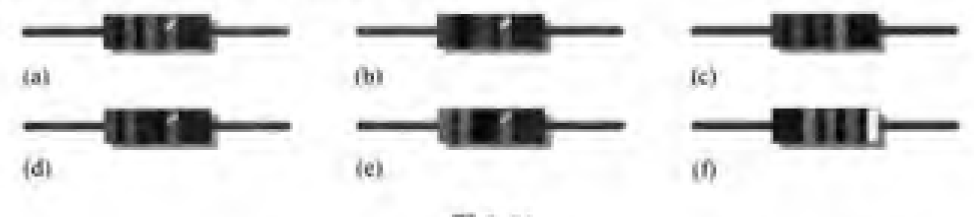


图 2.31

5. 从图 2.32 中挑选出具有下列阻值的电阻：330 Ω，2.2 kΩ，56 kΩ，100 kΩ 和 39 kΩ。

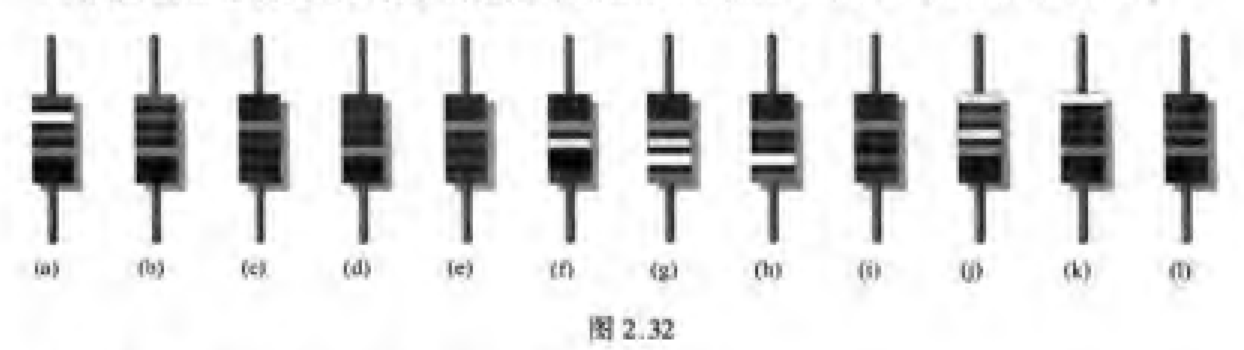


图 2.32

6. 下列字母数字式标记法所对应电阻的阻值是多少？

   (a) 33R　(b) 5K6　(c) 900　(d) 6M8
7. 变阻器和电位器最基本的区别是什么？
8. 什么是热敏电阻？

2.6　电路

一个基本电路是由一些物理元件相互连接所组成的，利用其中的电压、电流和电阻来实现某些有用的功能。

完成本节的学习后，读者应该能够：

- 描述一个基本电路
- 理解物理电路中的示意图
- 定义开路和闭合回路
- 描述各种类型的电路保护器件

■ 描述各种类型的开关
■ 解释导线尺寸是如何与规格数据相关联的
■ 定义接地

2.6.1 电流的方向

在发现电流后的几年中，人们假定电流是由正电荷的移动而形成的。然而在19世纪90年代，人们发现实际上是导体中的电子作为电荷的载体移动形成了电流。

现在，公认的电流方向的设定方式有两种。在很多电学和电子技术领域中习惯于采用电子流动方向，即在分析问题时假设电流从电源的负极流出，经过回路，流入电源的正极。与此相反，传统电流方向是假设电流从电源的正极流出，经过回路，流入电源的负极。如果按照后一种假设，在电源的内部有一个电压升高的过程(负极到正极)，而在通过电阻时有一个电压降低的过程(正极到负极)。

由于我们无法看到真实的电流，而只能看到它的影响，因此无论习惯用哪一种假设作为电流的方向实际上都没有差别。电路分析的结果不会因为假设的不同而受到影响。分析中的方向问题在很大程度上是个人偏好的问题，上述两种方法都有各自的支持者。

传统电流方向在电子学技术领域中应用广泛，并且在工程学中几乎特定使用这种假设方向。本书中所使用的都是传统电流方向，如果用电子流动方向来替换也是可行的。

安全提示：当电路接上电源时，为避免电击，不要接触电路。如果需要更改电路、移除元件或更换元件，首先要确定电源是断开的。

2.6.2 基本电路

一个基本电路由一个电压源、一个负载和在电源与负载间电流的流通路径组成。图2.33以一个简单的电路为例：一个电池用两根导线与灯泡相连接，其中电池就是电压源。由于灯泡是从电池中获得电流，所以相对于电池它是一个负载，而两根导线为电流从电源正极流到灯泡再流入电源负极提供了路径。电流流过灯丝(具有电阻)，使其发出可见光。电流是由电池化学反应产生的。在一些实际情况中，电池的一端一般会连接到一个公共点或接地点上。例如，大部分汽车的电池负极连接到汽车的金属底盘上，而这个底盘在汽车电力系统中作为完成回路的导体，相当于接地点。

2.6.3 电路原理图

一个电路可以利用各种元件的标准符号来画出一幅原理图。根据图2.33中的简单电路所画的原理图如图2.34所示。原理图以一定的连接方式表示电路中各种元件的连接情况，及其在电路中的作用。

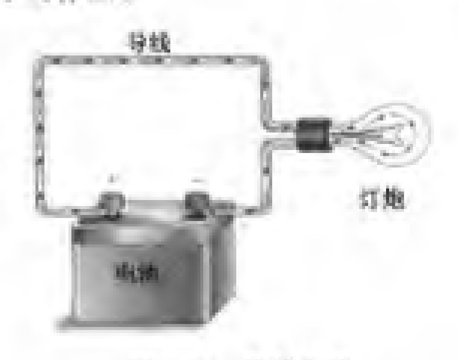


图2.33 简单电路

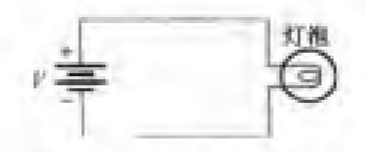


图2.34 图2.33的原理图

2.6.4 灯泡开路和闭合回路

图2.33中的电路是一个闭合回路。使电流拥有一个完整流通路径的回路称为闭合回路，当电流的路径断开时，这个电路称为开路。

开关 开关用来控制回路的开路和闭路，是通过机械或电子的方法实现的。例如，图2.35所示为一个电灯开关在开和关状态下的电路图和相关示意图。图中所示的是一个单刀单掷(SPST)的拨动开关。拨动这个词对应开关上的活动手柄，而掷这个词是指通过单个开关的拨动(一个手柄的移动)所影响(即开和关)的触点数。

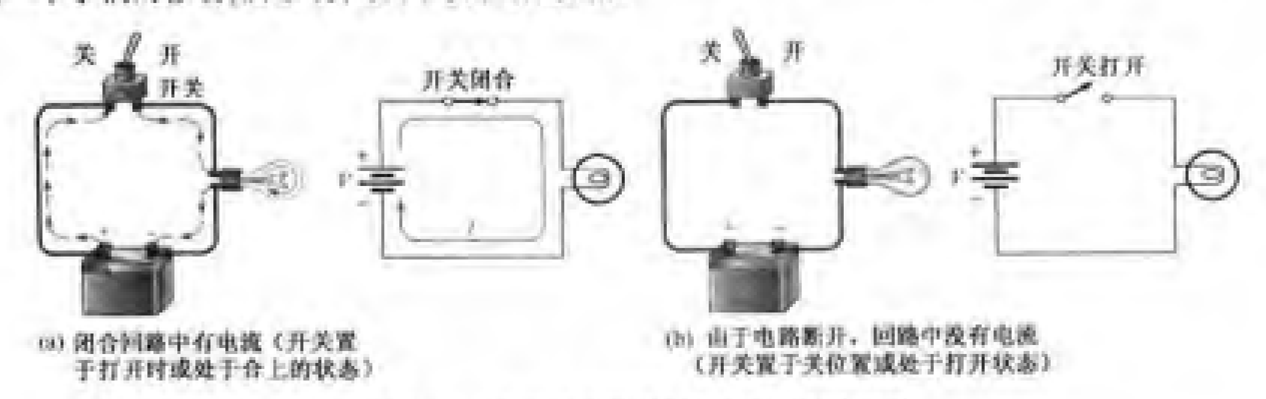


图2.35 用SPST开关控制的开路和闭合回路

图2.36显示了几个比较复杂的电路，是利用单刀双掷开关(SPDT)来控制通过两盏电灯的例子。如果一盏灯亮，则另一盏灯灭，反之亦然。两种状态下的示意简图如图2.36(b)和图2.36(c)所示。

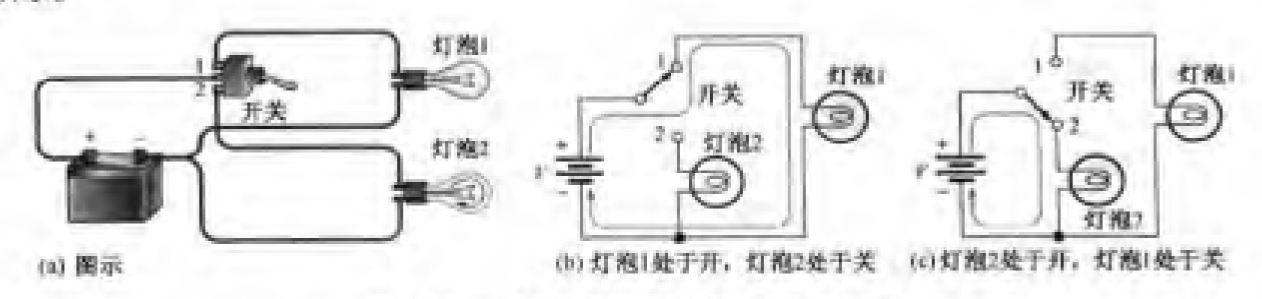


图2.36 一个SPDT开关控制两盏电灯的例子

除了SPST和SPDT开关[符号见图2.37(a)和图2.37(b)]，还有很多其他类型的开关也很重要，如下：

- 双刀单掷开关(DPST)。DPST开关允许连接两对触点的两个触臂同时打开或闭合，其表示符号如图2.37(c)所示。虚线表示两个触臂是通过机械连接的，拨动开关时可以一同移动。



图2.37 开关符号

- 双刀双掷开关(DPDT)。DPDT 开关提供了一对触点与另外两对触点间的连接,原理图如图 2.37(d)所示。
- 按钮开关(PB)。图 2.37(e)显示的是一个常开按钮开关(NOPB)。按钮按下时,两个触点连接;按钮放开时,连接断开。与之相反,图 2.37(f)显示的是一个常闭按钮开关(NCPB)。按钮按下时,两触点间的连接断开。
- 旋转开关(波段开关)。转动一个旋转开关的旋钮可以使一个触点与其他几个触点中的任意一个相连接。图 2.37(g)显示了一个简单的六点旋转开关。

图 2.38 列出了几种开关的实物图,图 2.39 显示了一个典型拨动开关的结构图。



图 2.38 典型机械开关

电路保护器件 保险丝和断路器用于电路出现故障或反常情况致使电流超过一定数值时,使电路开路的装置。例如一个 20 A 的保险丝或断路器,当电流超过 20 A 时,将使电路断开。



图 2.39 典型拨动开关的结构图

保险丝和断路器的基本区别在于当保险丝损坏时需要重新替换,但断路器断开时,只需要重新复位就可以重复使用。这两种器件都用来防止过载电流损坏电路,或防止当电流过大导致导线或其他元件过热而产生的危险情况。几种典型的保险丝和断路器连同其示意符号如图 2.40 所示。

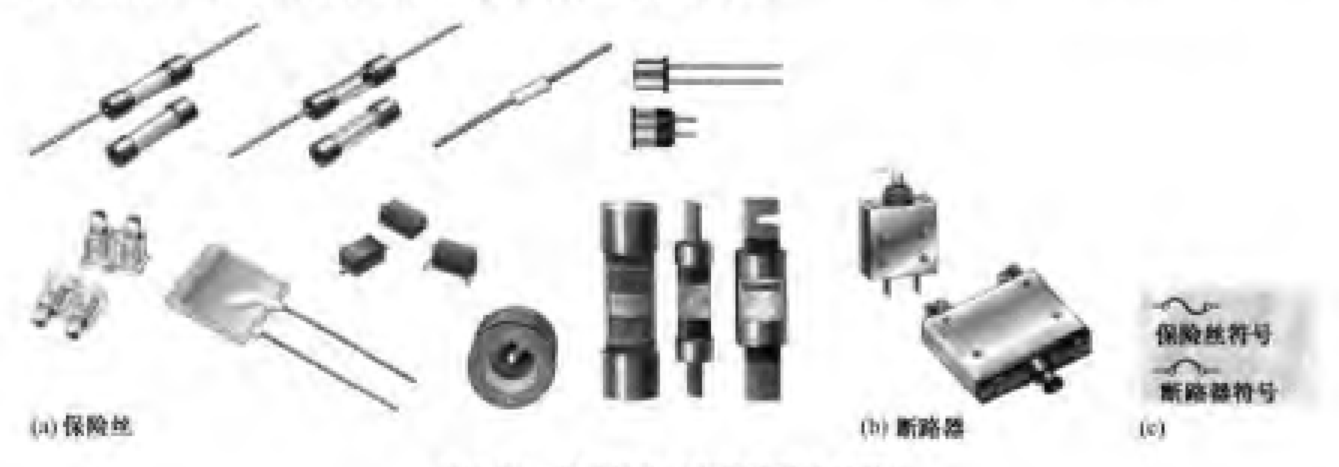


图 2.40 典型保险丝和断路器及其符号

2.6.5 导线

导线是由导电物质构成的，常用于电学应用中。导线的直径有很多种，可以根据标准规格数据来排列，这种标准规格数据称为美国导线规格（AWG，American Wire Gauge）尺寸。导线的规格数据越大，其直径就越小。导线的尺寸是根据其横截面积确定的。如图 2.41 所示，导线横截面积的单位是圆密耳，缩写为 CM。1 圆密耳的导线直径为 0.001 英寸(in)[①]（1 密耳）。可以看出，导线的横截面积是由其直径的平方来表示的，直径的单位为千分之一英寸。表达式如下：



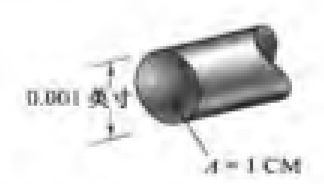


图 2.41 导线的横截面积

$$A = d^2 \tag{2.5}$$

A 为导线横截面积，单位为圆密耳；d 为导线直径，单位为密耳。表 2.4 列出了 AWG 尺寸导线所对应的横截面积，以及在 20℃时每 1000 英尺(ft)[②]导线所对应电阻的阻值。

表 2.4 美国导线规格(AWG)尺寸和对应阻值

AWG #	横截面积(CM)	阻值(20℃时 Ω/1000 ft)	AWG #	横截面积(CM)	阻值(20℃时 Ω/1000 ft)
0000	211 600	0.0490	19	1288.1	8.051
000	167 810	0.0618	20	1021.5	10.15
00	133 080	0.0780	21	810.10	12.80
0	105 530	0.0983	22	642.40	16.14
1	83 694	0.1240	23	509.45	20.36
2	66 373	0.1563	24	404.01	25.67
3	52 634	0.1970	25	320.40	32.37
4	41 742	0.2485	26	254.10	40.81
5	33 102	0.3133	27	201.50	51.47
6	26 250	0.3951	28	159.79	64.90
7	20 816	0.4982	29	126.72	81.83
8	16 509	0.6268	30	100.50	103.2
9	13 094	0.7921	31	79.70	130.1
10	10 381	0.9989	32	63.21	164.1
11	8234.0	1.260	33	50.13	206.9
12	6529.0	1.588	34	39.75	260.9
13	5178.4	2.003	35	31.52	329.0
14	4106.8	2.525	36	25.00	414.8
15	3256.7	3.184	37	19.83	523.1
16	2582.9	4.016	38	15.72	659.6
17	2048.2	5.064	39	12.47	831.8
18	1624.3	6.385	40	9.89	1049.0

例 2.7 直径 0.005 英寸的导线横截面积为多少？

解：

$$d = 0.005\text{ 英寸} = 5\text{ 密耳}$$

$$A = d^2 = 5^2 = \mathbf{25\ CM}$$

练习：直径为 0.0015 英寸的导线横截面积为多少？

---

① 1 英寸 = 2.45 cm——编者注

② 1 英尺 = 0.3048 m——编者注

2.6.6 导线的电阻

尽管铜导线的导电能力非常好,但如同所有导体一样,仍具有一定的电阻。导线的电阻是由三个物理特性决定的:(a)导线材料的类型,(b)导线的长度,(c)导线的横截面积。此外,温度也影响导线的阻值。

每种类型的导电材料都有一个特性,称为电阻率 ρ。一种材料,在给定温度下的 ρ 都是一个常量。导线电阻用长度 l 和横截面积 A 表示的公式为:

$$R = \frac{\rho l}{A} \tag{2.6}$$

式(2.6)说明电阻与电阻率和导线的长度成正比,与导线的横截面积成反比。计算时,电阻单位为欧姆,长度单位必须为英尺,横截面积单位为圆密耳,而电阻率单位为 CM-Ω/ft。

例2.8 一根100英尺铜导线的横截面积为810.1厘米,铜的电阻率为10.37 CM-Ω/ft,求其电阻为多少。

解:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{(10.37\ \text{CM-}\Omega/\text{ft})(100\ \text{ft})}{810.1\ \text{CM}} = \mathbf{1.280\ \Omega}$$

练习:一根直径为0.0015英寸长度为1000英尺的铜导线,求其电阻。

回想一下,表2.4列出了各种标准尺寸的导线在20℃时每1000英尺所对应的电阻阻值。例如一根1000英尺长,AWG为14的铜导线所对应的阻值为2.525 Ω;一根1000英尺长,AWG为22的导线对应的阻值为16.14 Ω。在给定长度下,导线越细,阻值越大。因此,在给定电压的情况下,相对于细导线来说,导线越粗可以通过的电流就越多。

2.6.7 接地

接地这个词是指来自交流供电系统中的一种方法。通过将电力线的一端与一根打入地下的金属棒相连接,使该端在电力线中处于中性。这种接地方法称为地球接地。

在电气和电子系统中,用来嵌入部件的金属框架或在印刷电路板中的大型导电区域都用做电参考点,称为机壳接地或电路接地。电路接地并不一定真正与地球接地相连。例如,在大部分汽车中电池的负端与所有电路的一端都连接到金属底盘上。

在电路中,接地相当于一个参考点,即对应于电路中的其他点来说其电位为0 V。一个电路中所有接地点的电位都相等,所以可以看做公共点。图2.42中列出了两种接地符号。图2.42(a)中的符号通常用于表示参考点接地,图2.42(b)中的符号用来表示机壳接地。本书中所用的是图2.42(a)中的符号。

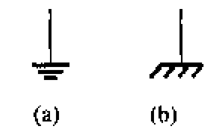


图2.42 接地符号

图2.43举例说明了一个含有接地连接的简单回路。电流从12 V电源的正极流出,经过灯泡,通过接地连接返回电源的负极。接地为电流流回电源提供了返回路径,这是由于所有的接地点都可以看成同一个点。相对于地,电路中的最大电压为+12 V。

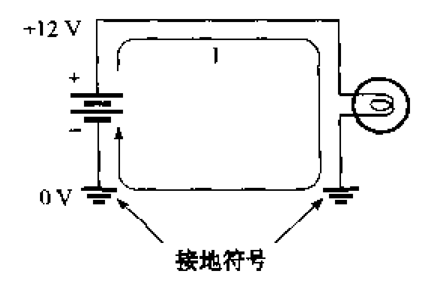


图2.43 含有接地连接的简单电路

2.6节练习

1. 组成一个电路的基本元件有哪些?

2. 什么叫开路?
3. 什么叫闭合回路?
4. 理想情况下开关打开时阻值为多少? 开关闭合时阻值为多少?
5. 保险丝和断路器的区别是什么?
6. AWG 3 和 AWG 22 的导线,哪一个直径大?
7. 在一个电路中什么叫接地?

2.7 基本电路测量

一名电子工业技术人员不知道如何测量电压、电流和电阻是无法工作的。

完成本节的学习后,读者应该能够:

- 进行基本电路测量
- 正确测量一个电路中的电压
- 正确测量一个电路中的电流
- 正确测量电阻
- 能够设置基本的仪表以及掌握如何读数

在电子技术操作中通常会需要测量电压、电流和电阻。回想一下在第1章介绍的测量工具。测量电压的工具为伏特表,测量电流的工具为安培表,而测量电阻的工具为欧姆表。通常这三种工具可以合并称为万用表,并且是通过旋转开关选择适当功能测量其对应的量来实现的。

图2.44列出了两种典型的万用表,图2.44(a)是一个带有指针的模拟万用表,图2.44(b)是一个数字万用表,即通过数字读取被测量。很多数字万用表也有一个刻度表盘。


(a)


(b)

图2.44 典型便携式万用表(图片使用经B&K Precision Corp.许可)

2.7.1 仪表符号

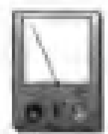
在本书中所用的一些表示电路中仪表的符号如图2.45所示。可以看到伏特表、安培表或欧姆表的四种表示符号。应用中根据其各自不同的作用来决定使用哪种符号。数字表符号用于电路中有特定值需要显示时,刻度表符号和指针表符号用来说明一个量的相对变化或数值改变时电路的操作。不是要显示特定数值,而是需要描述其变化,就好像可以通过一个箭头来表示其一个改变的量的上升或下降。通用符号用于没有数值或没有数值改变需要说明的情形,仅仅用来说明电路中仪表的位置。

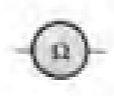



(a) 数字式



(b) 条线图式


(c) 模拟指针式



(d) 通用的

图2.45 本书中所用的仪表符号,每种符号都可以用来表示安培表(A)、伏特表(V)或欧姆表(Ω)

2.7.2 测量电流

图 2.46 说明了利用安培表如何测量电流。图 2.46(a)显示了一个测量通过电阻电流的简单电路。首先确定安培表的量程，该量程必须要大于可能流过的电流值。然后，如图 2.46(b)所示，通过打开一端电路按照电流通过的路径接入安培表。图 2.46(c)显示的是安培表接入后的电路图。上述这种连接称为串联。安培表的极性必须是电流从正极流入，从负极流出。

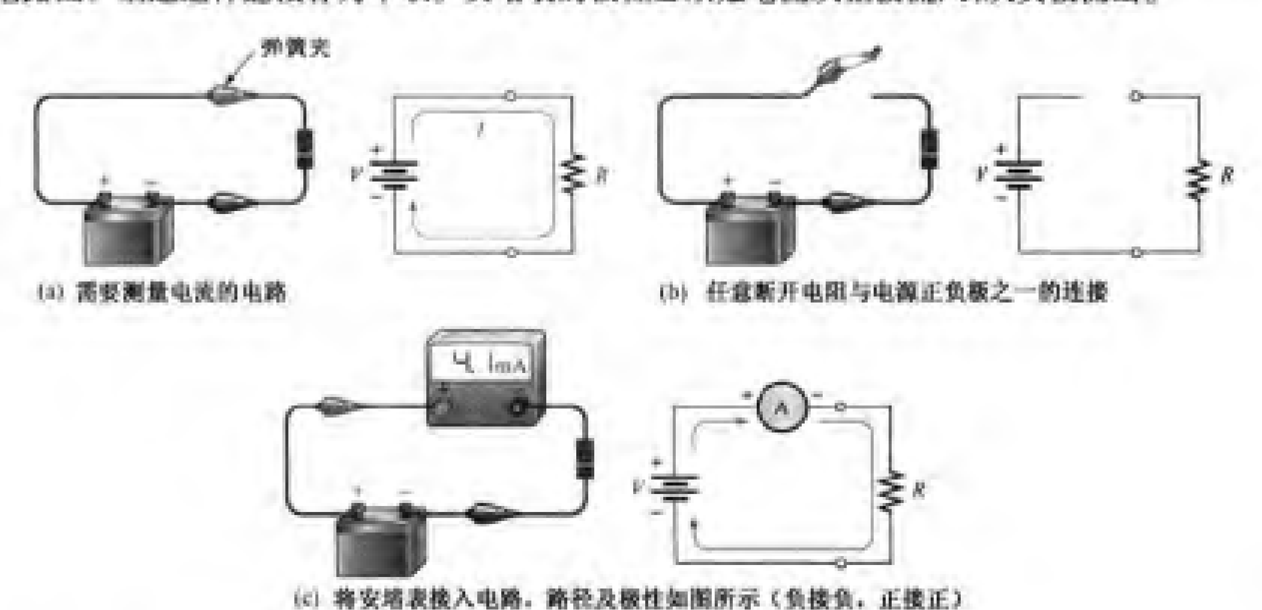


图 2.46 利用安培表测量电流的简单电路连接图

2.7.3 测量电压

测量电压，将伏特表连接到被测元件的两端，即可测得电压，这种连接称为并联。伏特表的负极必须与电路的负端相连，正极必须与电路的正端相连。图 2.47 显示的是测量电阻电压的伏特表的连接图。

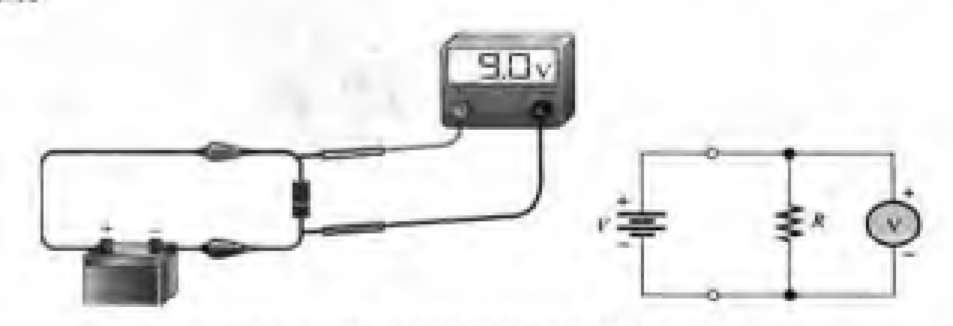
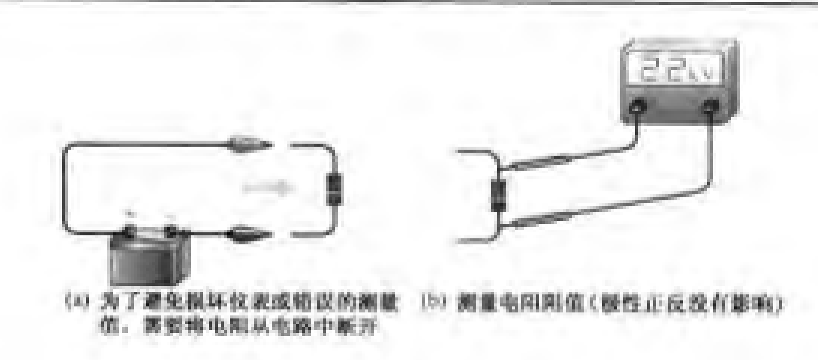


图 2.47 利用伏特表测量电压的简单电路

2.7.4 测量电阻

要测量电阻，首先关掉电源，然后将电阻的一端或两端从电路中断开，再将欧姆表连接到电阻的两端，这一过程如图 2.48 所示。



(a) 为了避免损坏仪表或错误的测量值，需要将电阻从电路中断开　(b) 测量电阻阻值（极性正反没有影响）

图 2.48　用欧姆表测量电阻

安全提示：接触电路时不要携带钥匙或佩戴任何金属首饰，否则容易发生意外，造成电击或电路的损坏。

2.7.5　数字万用表

数字万用表（DMM）是电子测量仪器中应用最广泛的一种。数字万用表通常提供很多功能，相对于很多模拟表具有较好的精确性，更易读数，也有着更高的可靠性。但模拟表有一个优势强于数字表，即可以显示被测量的短期变化以及变化趋势，而数字表通常由于时间过短而无法显示。图 2.49 显示了典型的数字万用表。



(a)　(b)

图 2.49　典型数字万用表（DMM）（图片使用经 B&K Precision Corp. 许可）

数字万用表的功能　数字万用表所具有的基本功能如下：

- 欧姆挡
- 直流电压和电流挡
- 交流电压和电流挡

一些数字万用表还提供一些特殊功能，如晶体管或二极管的测试、电源的测量和音频放大器测试中的分贝测量等。一些万用表需要手动选择各功能的量程，但很多可以自动选择量程，称为自动换程。

数字万用表的显示　数字万用表是利用液晶显示屏（LCD，liquid-crystal display）或发光二极管（LED，light-emitting diode）来显示读数的。由于只需要很小的电流，LCD 是最通用的电池驱动显示器。一个典型的电池驱动的数字万用表（带 LCD 显示器）装一个 9 V 电池可以使用几百小时到 2000 小时，甚至更长。LCD 显示器的缺点在于：(a)在灯光很暗的条件下很难或几乎不可能看见读数，(b)响应测量值的变化比较慢。与之相反，LED 显示器可以在黑暗中读数且对于测量值的变化响应较快。但相比于 LCD，LED 显示需要较大的电流，所以将其用于便携式仪器中时电池寿命较短。

LCD 和 LED 数字万用表都是七段显示形式。如图 2.50(a)所示，每个数字的显示都是由七个分段组成的。如图 2.50(b)所示，每一个十进制都是由适当的分段激活形成的。此外，除了七分段，还有一个小数点。



图 2.50　七段显示

分辨率　仪表的分辨率是仪表可以测量的最小增量。这个增量越小，分辨率就越高。决定仪表分辨率的因素之一是所显示数字的总数。

由于很多仪表都是用 $3\frac{1}{2}$ 数字来显示的，所以我们以这种情况为例来说明。一个 $3\frac{1}{2}$ 数字万用表有三个能显示数字 0 到 9 的数位和一个只能显示数字 0 或 1 的数位，而后者称为半位，是显示中的最高有效位。例如，假设数字万用表的读数为 0.999 V，如图 2.51(a)所示。如果电压上升 0.001 V 到达 1 V，正确显示应该为 1.000 V，如图 2.51(b)所示。“1”所在的数位就是半位，因此用 $3\frac{1}{2}$ 数字表显示，增量 0.001 V 就是其分辨率。

现在，假设电压上升到 1.999 V，如图 2.51(c)所示。如果电压上升了 0.001 V 到达 2 V，半位数无法显示“2”，所以正确显示为 2.00。其半位数为空，只有三位数起作用，如图 2.51(d)所示。在用 $3\frac{1}{2}$ 数字表显示时，由于只有三位数起作用，故其分辨率为 0.01 V 而非 0.001 V。如果将 0.01 V 加在 19.99 V 上，读数变为 20.0 V，分辨率也变为 0.1 V；而如果将 0.1 V 加到 199.9 V 上，读数变为 200 V，分辨率相应地变为 1 V，依次类推。



(a) 分辨率 0.001 V



(b) 分辨率 0.001 V



(c) 分辨率 0.001 V



(d) 分辨率 0.01 V

图 2.51　用一个 $3\frac{1}{2}$ 数字万用表来说明应用中随着数值的变化，分辨率如何变化

数字万用表的分辨能力也可以由内电路和被测量的采样率来决定。$4\frac{1}{2}$ 显示到 $8\frac{1}{2}$ 显示的数字表都有。

精确度　精确度是表示被测值的准确度或可接受的误差程度，一个数字万用表的精确度是由其内电路和校准程度决定的。一般万用表的精确范围为 0.01% 到 0.5%。如果是一些精密实验室级别的万用表，精确度可以达到 0.002%。

2.7.6　模拟万用表的读取

图 2.52 为一个典型的模拟万用表，可以用来测量直流量和交流量以及电阻阻值。它具有四个可选功能：直流电压（DC VOLTS）、直流毫安（DC mA）、交流电压（AC VOLTS）和欧姆（OHMS）。大部分模拟表的功能都与此类似。



图 2.52　典型模拟万用表

每一种功能都含有几个量程，在选择开关的两边括号内注明。例如，直流电压功能包括0.3 V，3 V，12 V，60 V，300 V和600 V六个量程，因此可以测量从满度值为0.3 V到满度值为600 V之间的所有电压值。在直流毫安功能中，可以测量从0.06 mA到120 mA之间不同的电流值。而在欧姆挡，设置了×1，×10，×100，×1000和×100 000五挡量程。

欧姆挡刻度　欧姆挡的读数是通过万用表刻度盘最顶端的一圈刻度来读取的。这圈刻度是非线性的，即整圈刻度分割得大小不同，如图2.52所示。从右向左看时，可以发现刻度是逐渐密集的。

欧姆挡的读数，由刻度盘上指针所指刻度值与选择开关所选择的量程相乘得到。例如，选择开关置于×100挡，指针指到20，则该读数应为20×100=2000 Ω。

再举一个例子。假设选择开关置于×10挡，指针指到1与2之间的第七个分刻度，读数为17 Ω(1.7×10)。如果被测电阻不变，将量程置于×1挡，则指针将移动到15到20之间的第二个分刻度处，其读数仍然为17 Ω。这说明一个电阻的阻值可以通过不止一个量程来测量。此外，每次转换量程时都需要调零，只需要将万用表两端的导线相连调节指针即可。

交流－直流挡刻度　万用表刻度盘上侧面标记着"AC"和"DC"的第二、第三和第四圈刻度值，是用于直流电压、直流毫安和交流电压功能的读数。较高一圈的AC-DC刻度值的末尾标记是300，这圈刻度常用于量程范围为3的倍数，如0.3，3和300的读数。例如当量程置于直流电压功能的3这一挡，则刻度300处即为满度值3 V；当量程置于300挡，满度值即为300 V，依次类推。

中间一圈AC-DC刻度值的末尾标记为60，用于量程范围为6的倍数(如0.06，60和600)的读数。例如，当量程置于直流电压功能的60这一挡，满度值为60 V。

较低的这一圈AC-DC刻度值的末尾标记为12，用于量程范围为12的倍数(如1.2，12和120)的读数。

例2.9　根据图2.53确定被测量(电压、电流和电阻)及其值。


(a)


(b)


(c)

图2.53

解：(a) 图2.53(a)中的选择开关置于直流电压功能的60 V挡，根据中间一圈AC-DC刻度值读出数值为18 V。

(b) 图2.53(b)中的选择开关置于直流毫安功能的12 mA挡，根据较低一圈AC-DC刻度值读出数值近似为7.2 mA。

(c) 图2.53(c)中的选择开关置于欧姆功能的×1000挡，根据欧姆挡刻度读出数值近似为7 kΩ。

练习：图2.53(c)中如果将量程转换到×100挡，被测电阻不变，指针将如何变化？

2.7 节练习

1. 说出测量下列数据所用仪表的名称:(a)电流,(b)电压,(c)电阻。
2. 用两个安培表置于图 2.36 的电路中,分别测量流过两个灯泡的电流(注明极性)。问如何利用一个安培表来完成上述测量。
3. 如何利用伏特表测量图 2.36 中第二个灯泡的电压。
4. 列出两种常用数字万用表,并说明其优缺点。
5. 定义数字万用表的分辨率。
6. 图 2.52 中的万用表开关置于直流电压功能的 3 V 挡,指针指到较高一圈 AC-DC 刻度值中的 150 处,求其测量的电压值为多少?
7. 如果测量 275 V 的直流电压,如何选择量程,需要选择哪一圈刻度值来读取?
8. 如果想要测量的电阻值超过 20 kΩ,需要选择的量程是多少?

2.8 安全用电

在工作中用电安全是非常重要的。遭受电击和灼伤的可能也总是会出现,所以常常需要特别小心操作。当电压加到你身体上的任意两点时,你就为电流的通过提供了流通路径,而电流会产生电击。电元件常在高温下运行,所以皮肤接触到它时就可能被灼伤。此外,电的使用也使火灾发生的可能性增加。本节将介绍一些安全知识和事故预防措施。

完成本节的学习后,读者应该能够:

- 认识电类灾害并遵守适当的安全程序
- 描述电击的成因
- 列出通过身体的电流路径
- 论述电流对人类身体的影响
- 列出用电操作时应该注意的安全预防措施

2.8.1 电击

电流(不是电压)通过你的身体是产生电击的原因。当然,是由于电压加在电阻两端才会产生电流。如果你身体上的一点与一个电压点相接触,另一点又接触到不同的电压或直接接地,比如触碰金属底盘,则必然会有电流在你的身体中从一点流向另外一点。电流流通的路径是由你身体与电压的接触点决定的,电击后果的严重性由电压的大小以及通过你身体的路径来确定。通过你身体的电流路径决定了哪些组织器官会受到影响。

电流通过人类身体的影响 电流的大小是由电压和电阻阻值决定的。人类身体具有的电阻是由以下几个因素决定的:身体的质量、皮肤湿润度和身体与电压的接触点等。表 2.5 列出了不同的电流值对身体的影响。

身体阻值 人类身体的阻值一般在 10 kΩ 到 50 kΩ 之间,取决于被测两点所处的位置。皮肤的湿润度也是影响被测两点间阻值的因素之一。已知阻值即可根据表 2.5 确定不同电压对人的各种影响。例如,如果身体上两点间的阻值为 10 kΩ,在两点间加 90 V 电压,将会产生足够导致疼痛冲击的电流(9 mA)。

表2.5 电流对身体的影响，数值随身体质量变化

电流(mA)	对身体的影响
0.4	很轻微的感觉
1.1	开始有较强的感觉
1.8	震动，但不疼痛，肌肉也没有失去控制
9	疼痛冲击，肌肉没有失去控制
16	疼痛冲击，摆脱阈值
23	强烈的疼痛冲击，肌肉收缩，呼吸困难
75	心室开始纤维颤动
235	心室纤维颤动，通常持续5秒或更长时间即可致命
4000	心脏麻痹(无心室纤维颤动)
5000	身体组织燃烧

2.8.2 安全预防措施

使用电气或电子仪器时应该注意很多事情，下面列举了一些较重要的安全预防措施。

- 避免接触任何电压源。需要接触电路元件时，需要关闭电源。
- 不要单独工作。
- 感到疲劳或服用具有催眠性质的药物时不要工作。
- 工作时不要带戒指、手表或其他金属首饰。
- 使用仪器前必须了解正确的操作程序，而且要意识到潜在的危险。
- 使用仪器必须使用三线电源线(三插头)。
- 确定电源线是在良好的状况下工作，且接地针没有丢失或弯曲。
- 保持对工具的适当维护，保证在良好条件下金属工具手柄的绝缘性。
- 正确操作工具，工作环境整洁。
- 在需要的时候带上防护眼镜，特别是焊接导线时。
- 用手接触电路的任何部分之前都必须关闭电源并让电容放电。
- 清楚紧急情况下电源如何开关和紧急出口的位置。
- 永远不要踩踏或拨弄安全装置，如保险开关等。
- 一直穿着鞋并保持其干燥，不要站在金属或湿地上。
- 手湿的时候不要接触仪器。
- 碰触前要用可靠的仪表反复检查，永远不要理所当然地认为电路是断开的。
- 设置电子电源的限幅器，防止电流超过测试电路所需的电流值。
- 电容等可以在电源移除后长时间储存致命电量的器件，必须在接触前让其完全放电。
- 在连接电路时，与最高电压点连接总是作为最后一步。
- 不要接触电源终端。
- 一定要使用带有绝缘外皮的导线或带有绝缘套的连接器或夹子。
- 保持电缆或导线尽可能短。
- 汇报任何不安全情况。
- 了解并遵守所有工作车间和实验室规则。
- 如果有人无法脱离一个带电导体，应立即关闭电源。如果不能关闭电源，利用不导电的物体将触电者的身体与带电导体分开。

2.8 节练习

1. 接触电时，是什么导致身体疼痛或危害健康？
2. 在电路中工作时，可以携带戒指。（对或错）
3. 用电时站在湿地上没有安全问题。（对或错）
4. 如果小心，电路重新连线时可以不移除电源。（对或错）
5. 电击可以造成剧烈疼痛或致命。（对或错）

技术实践

在这次的技术实践中，是将一个直流电压应用到电路中产生电流。当电流通过时，灯泡发光。此外，读者将实践如何通过电阻来控制电流。下面讲述的电路是类似汽车上的仪表照明电路，通过它可以加强或降低光线的亮度。

汽车的仪表盘照明电路使用一个 12 V 的电池作为电路的电压源。这个电路使用一个电位器作为变阻器，通过仪表盘上的旋钮控制通过灯泡电流的大小进而控制光线的明暗。光线的明暗与通过灯泡的电流量成比例。仪表盘照明灯的开关与用来控制前车灯的开关是同一个。这里还有一个保险丝用于短路时的电路保护。

图 2.54 给出了这个照明电路的示意图。图 2.55 是模仿照明电路的试验板电路连接图。图中所使用的元件功能与实际电路相似，但并非实际汽车上的照明电路器件。汽车的电池由一个实验室直流电源来代替。图 2.55 中的电路板是一种常用的构建电路的测试平台。

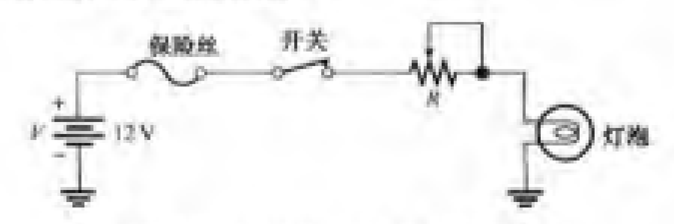


图 2.54 汽车仪表盘照明电路示意图

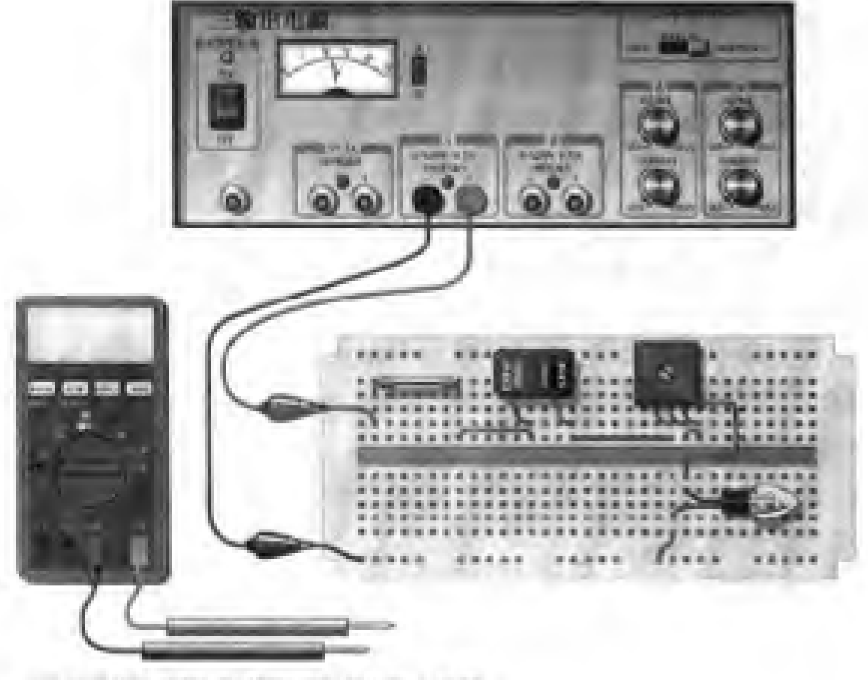


图 2.55 模仿汽车照明电路的测试平台

测试平台

图2.55中显示了一块电路试验板和一个直流电源以及一个数字万用表。电源设置成向电路提供12 V电压。万用表用来测量电路中的电流、电压和电阻。

- 识别电路中的每一个元件并检查电路试验板上的电路连接是否符合图2.54中的电路图要求。
- 解释电路中每一个元件的用途。

典型的电路试验板是由一排排小插孔组成的，这些小插孔用来插元件引脚或导线。在这种特殊构造中，如图2.55右下方所示，每一列的五个插孔是连通的，可以将其视为一点，电路板靠边缘的插孔也是连通的。

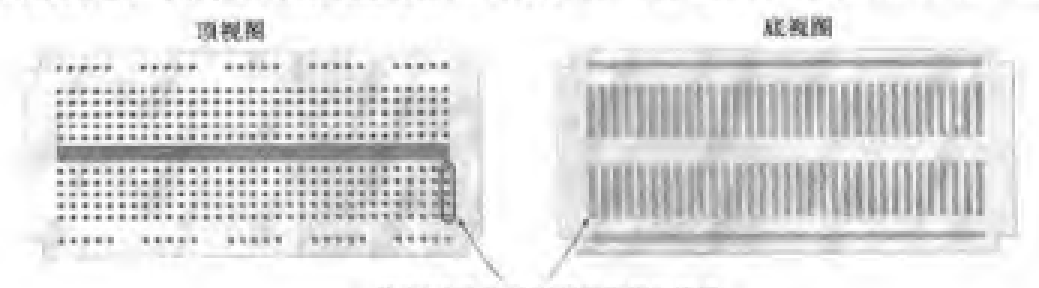


图2.56　典型电路试验板

利用万用表测量电流

测量电流时万用表选择开关必须置于安培表功能处。为了将测量电流的万用表串入电路，需要先断开连续回路，参见图2.57。

- 画出图2.54中添加安培表情况下的示意图。
- 在哪种测量值(A，B或C)下灯泡最亮？请解释为什么。
- 写出电路如何变化会导致安培表读数从A变化到B。
- 写出安培表读数为C时的电路状态。

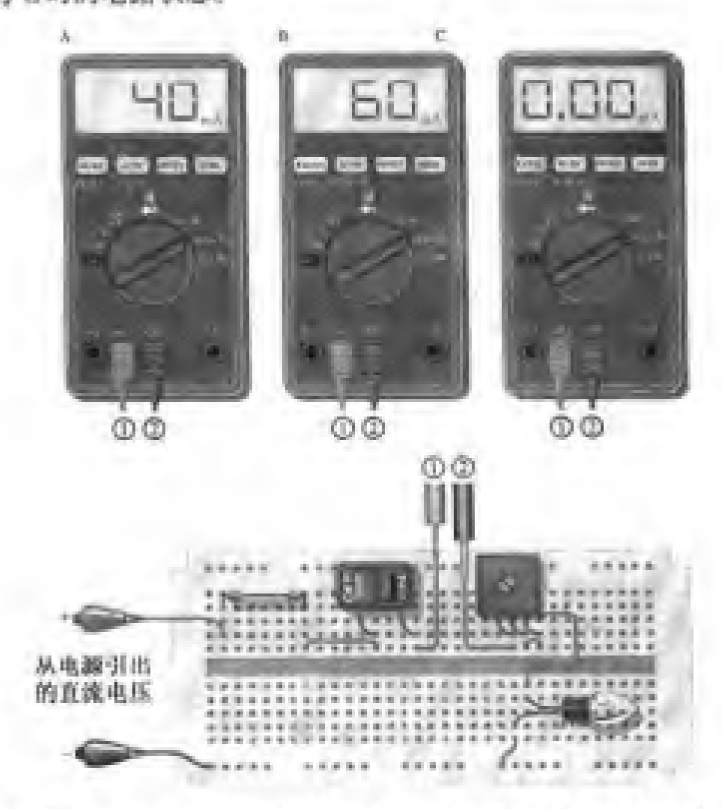


图2.57　电流测量(带圈的数字表示万用表与电路的连接)

利用万用表测量电压

测量电压时万用表选择开关必须置于伏特表功能处，必须将伏特表并联在被测点的两端，参见图 2.58。

- 重新画出图 2.54 中添加伏特表情况下的示意图。
- 图中测量的是哪一个元件？
- 在哪种测量值(A 或 B)下灯泡比较亮？请解释为什么。
- 写出电路如何变化导致伏特表读数从 A 变化到 B。

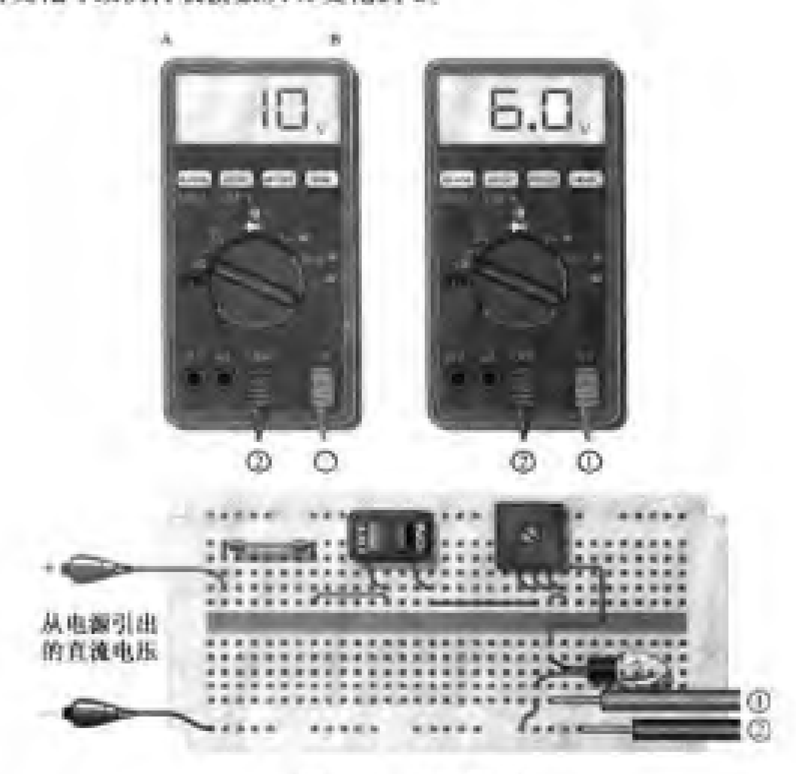


图 2.58 电压测量

利用万用表测量电阻

测量电阻时万用表选择开关必须置于欧姆表功能处。在连接欧姆表之前，必须先将被测电阻从电路中移除。在拆除任何元件前首先要关闭电源，参见图 2.59。

- 图中测量的是哪一个元件的电阻？
- 重新连接电路并打开电源时，在哪种测量值(A 或 B)下灯泡比较亮？请解释其原因。

技术实践练习

1. 如果仪表盘照明电路中的直流电源电压降低，会对灯泡亮度产生何种影响？请解释为什么。
2. 如何调节变阻器的值(升高或降低)可以使灯光变亮？

小结

- 原子是一个元素中保留该元素特性的最小微粒。
- 当原子最外层轨道电子(价电子)脱离该原子的束缚后，就变成自由电子。
- 自由电子的定向移动产生电流。
- 同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。
- 电路中有电压才能产生电流。
- 电阻限制电流。

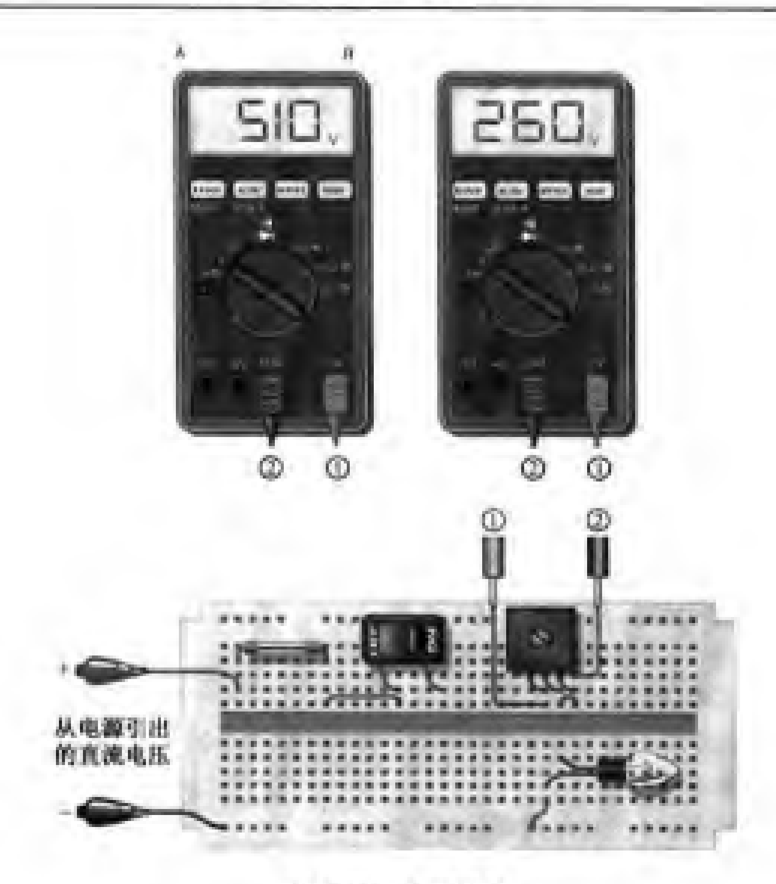


图 2.59　电阻测量

- 基本电路由电源、负载和电流流通路径组成。
- 开路是电流流通路径被断开。
- 闭合回路有一个完整的电流流通路径。
- 安培表串联在电路中。
- 伏特表并联在电路中。
- 欧姆表连接在电阻的两端(电阻必须从电路中移除)。
- 6.25×10^{18} 个电子所带的电荷总数为 1 库仑。
- 在某两点间如果每通过 1 库仑的电荷，所消耗的能量为 1 焦耳，则这两点间的电势差(电压)为 1 伏特。
- 在 1 秒钟内通过导体横截面的电子所带的电荷总数为 1 库仑，则导体中的电流量为 1 安培。
- 当电阻两端的电压是 1 伏特，通过的电流为 1 安培时，该电阻的阻值为 1 欧姆。
- 图 2.60 列出了本章所介绍的电学符号。

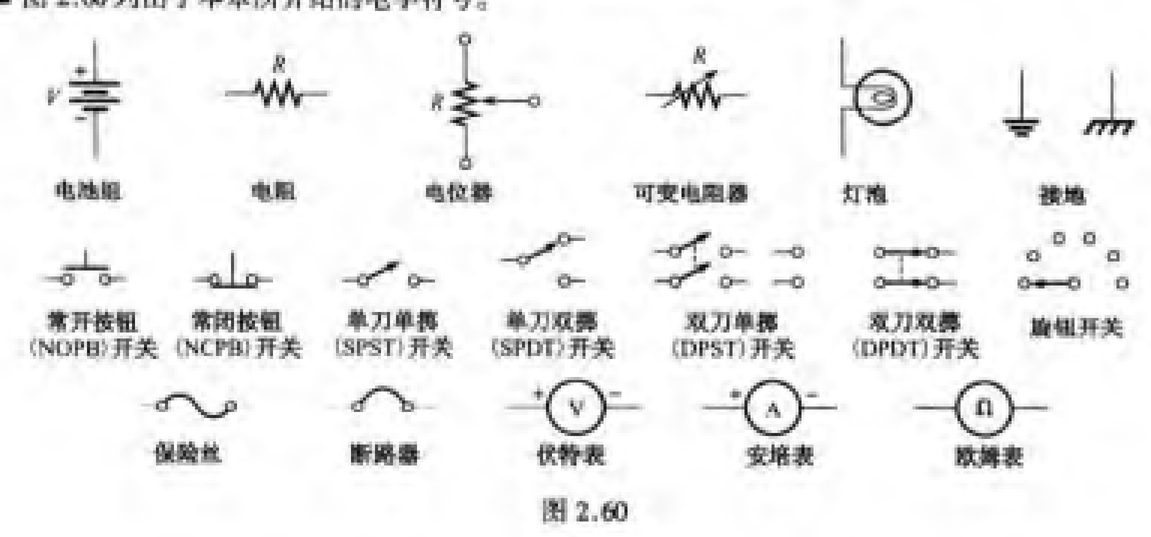


图 2.60

主要术语

安培表:一种测量电流的电学仪器。

安培(A):电流的单位。

原子:一个元素中保留该元素特性的最小微粒。

美国导线规格(AWG):一种基于导线直径的统一标准。

电荷:物质由于带有过量电子或缺少电子所具有的电特性。电荷有正有负。

电路:电气元件为产生一定的结果而相互连接称为电路。一个基本电路由一个电源、一个负载和电流的流通路径所组成。

闭合回路:具有一个完整的电流流通路径的电路。

电导:一个电路中允许电流通过的能力,单位是西门子(S)。

导体:一种电流可以轻易通过的物质,例如铜。

库仑(C):电荷的单位。

电流:电荷(电子)移动的速度。

电击:电流通过身体所产生的感觉。

电子:物质中带电的基本微粒,电子带负电荷。

自由电子:脱离原来所在原子的束缚而在物质原子结构中的原子间自由移动的价电子。

接地:电路中常用的参考点。

绝缘体:一种在常规环境下不允许电流通过的物质。

负载:电路中消耗能量的器件。

万用表:一种可以测量电压、电流和电阻的仪器。

欧姆(Ω):电阻的单位。

欧姆表:一种测量电阻的仪器。

开路:没有完整的电流流通路径的电路。

电位器:一个三端可变电阻。

电阻:一种可以阻碍电流的器件,单位为欧姆(Ω)。

变阻器:一个两端可变电阻。

半导体:一种导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,例如硅和锗。

西门子(S):电导的单位。

伏特(V):电压或电动势的单位。

电压:电子从电路中的一点移动到另一点所消耗的能量总数。

伏特表:一种测量电压的仪器。

公式

2.1 $Q = \frac{\text{电子数}}{6.25 \times 10^{18}\ \text{电子}/C}$ 电荷数

2.2 $V = \frac{W}{Q}$ 电压等于能量除以电荷数

2.3 $I = \frac{Q}{t}$ 电流等于电荷数除以时间

2.4 $G = \frac{1}{R}$ 电导是电阻的倒数

2.5 $A = d^2$ 横截面积等于直径的平方

2.6 $R = \frac{\rho l}{A}$ 电阻是电阻率乘以长度再除以横截面积

自测题

1. 一个原子序数为 3 的中性原子，其电子数为多少？
   (a) 1　(b) 3　(c) 0　(d) 由原子类型决定
2. 电子轨道称为：
   (a) 电子层　(b) 原子核　(c) 波形　(d)原子价
3. 两端加电压而没有电流通过的物质称为：
   (a) 滤波器　(b) 导体　(c) 绝缘体　(d) 半导体
4. 带正电荷的物质和带负电荷的物质相靠近将会：
   (a) 排斥　(b) 变成中性　(c) 吸引　(d) 交换电荷
5. 单个电子所带电荷数为：
   (a) 6.25×10^{-18} C　(b) 1.6×10^{-19} C　(c) 1.6×10^{-19} J　(d) 3.14×10^{-6} C
6. 电势差又叫做：
   (a) 能量　(b) 电压　(c) 电子到原子核的距离　(d) 电荷
7. 能量的单位是：
   (a) 瓦特　(b) 库仑　(c) 焦耳　(d) 伏特
8. 下列哪一个不是能量源？
   (a) 电池　(b) 太阳能电池　(c) 发电机　(d) 电位器
9. 下列哪种情况在电路中不可能发生？
   (a) 有电压没有电流　(b) 有电流没有电压　(c) 有电压也有电流　(d) 没有电压也没有电流
10. 电流的定义是：
    (a) 自由电子　(b) 自由电子移动的速度　(c) 移动电子所需能量　(d) 自由电子的电荷
11. 下列哪种情况下电路中没有电流？
    (a) 开关闭合　(b) 开关打开　(c) 没有电压　(d) 答案(a)和(c)　(e)答案(b)和(c)
12. 电阻的主要目的是：
    (a) 增加电流　(b) 限制电流　(c) 产生热　(d) 阻碍电流的变化
13. 电位器和变阻器属于下列哪个类型？
    (a) 电压源　(b) 可变电阻器　(c) 定值电阻器　(d) 断路器
14. 给定电路中的电流不超过 22 A。下列哪种保险丝最好？
    (a) 10 A　(b) 25 A　(c) 20 A　(d) 不一定需要保险丝

习题(带星号的题目较难，奇数序号的题目答案在本书末尾)

2.2 节　电荷

1. 求 50×10^{31} 个电子所带电荷总数为多少库仑？
2. 求多少电子所带电荷总数为 80 μC(微库仑)？

2.3 节　电压

3. 求下列情况下的电压值：
   (a) 10 J/C　(b) 5 J/2 C　(c) 100 J/25 C
4. 500 J 的能量用于移动 100 C 的电荷通过一个电阻，求这个电阻两端的电压是多少？
5. 要想用 800 J 的能量移动 40 C 的电荷通过一个电阻，求一个电池的电压为多少才可以实现？
6. 电池电压为 12 V，要移动 2.5 C 的电荷通过一个电路要消耗多少能量？
7. 如果 2 A 的电流通过一个电阻，在 15 s 内将 1000 J 的电能转换为热能，求电阻两端的电压为多少？

2.4节 电流

8. 求下列情况下的电流值：
   (a) 1 s内通过 75 C电荷　(b) 0.5 s内通过 10 C电荷　(c) 2 s内通过 5 C电荷
9. 在 3 s 内通过一点的电荷数为 0.6 C，求其电流为多少 A?
10. 当电流为 5 A 时，在多长时间内通过一点的电荷数为 10 C?
11. 当电流为 1.5 A 时，在 0.1 s 内通过一点的电荷数为多少?
12. 在 250 ms 内通过一根导线的电子数为 5.74×10^{17}，求其电流为多少 A?

2.5节 电阻

13. 根据下列色环确定电阻阻值：
    (a) 红、紫、橙、金　(b) 棕、灰、红、银
14. 列出习题 13 中的电阻允许偏差内的最大和最小阻值。
15. 列出下列阻值的色环：330 Ω，2.2 Ω，56 kΩ，100 kΩ 和 39 kΩ。
16. 一个线性电位器的滑动触点置于电位器可调部分的中点位置。如果该电位器总阻值为 1000 Ω，求其滑动触点与两端间的电阻阻值为多少?
17. 求下列阻值电阻的电导：
    (a) 5 Ω　(b) 25 Ω　(c) 100 Ω
18. 求与下列电导相对应的阻值：
    (a) 0.1 S　(b) 0.5 S　(c) 0.02 S

*19. 如图 2.61 所示，一个 120 V 的电压源通过两根等长导线与一个 1500 Ω 的电阻负载相连。电压源与负载的距离为 50 ft。如果两根导线的总阻值不超过 6 Ω，参阅表 2.4，求导线的最小规格尺寸为多少?

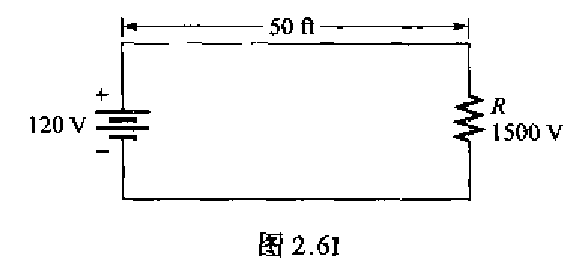


图 2.61

20. 确定下列电阻标记法中的电阻阻值和允许偏差：
    (a) 4R7J　(c) 5602M　(c) 1501F

2.6节 电路

21. 图 2.62(a)中的开关置于 2 点处，描述其电流流通路径。

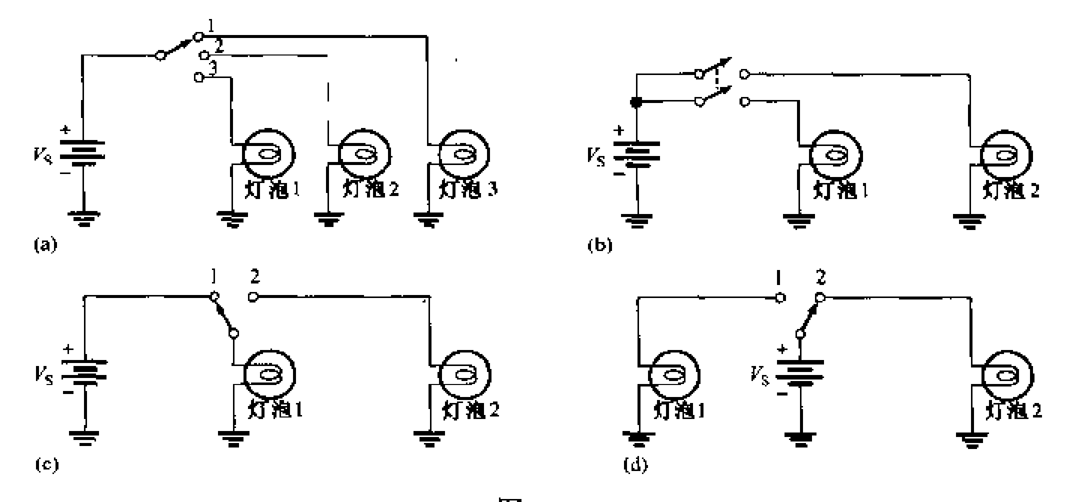


图 2.62

22. 当开关置于1或2中任意一点时，重新画出图2.62(d)中带有保险丝以防止电流过大的电路图。
23. 图2.62中只有一幅电路图有可能使电路中所有的灯泡同时亮，请指出这幅电路图。
24. 图2.63中无论开关置于何处，总有一个电阻中有电流通过，请指出这个电阻。

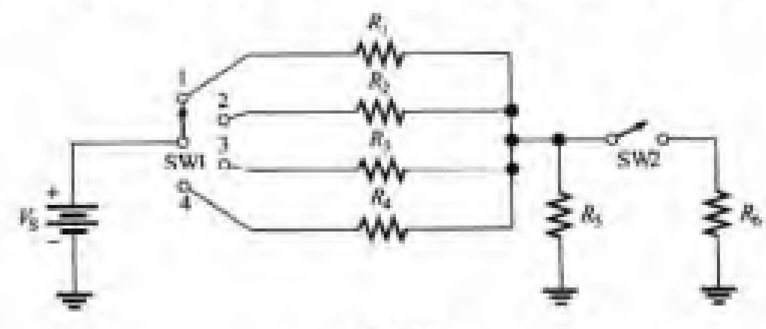


图2.63

*25. 设计一个开关以使两个电压源(V_{S1}和V_{S2})同时与两个电阻(R_1和R_2)中的任意一个相连，即V_{S1}连接R_1而V_{S2}连接R_2或V_{S1}连接R_2而V_{S2}连接R_1。

26. 图2.64中的方块代表一个立体声系统的不同部分。如何使用一个开关将唱片机、CD播放器、磁带录音机、AM调频和FM调频与扩音器相连，并保证任意时间只有一个部分与扩音器相连。

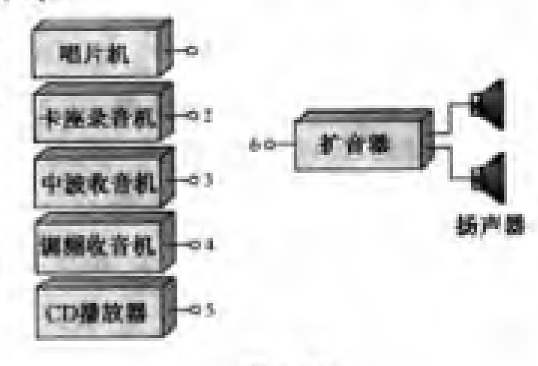


图2.64

2.7节　基本电路测量

27. 如果要测量图2.65中的电流和电源的电压，说明安培表和伏特表的摆放位置。
28. 解释如何测量图2.65中电阻R_2的阻值。
29. 说明图2.66中开关置于1点时每个伏特表的值，当开关置于2点时又是多少？
30. 忽略图2.66中的开关，说明如何连接一个安培表来测量电源流出的电流。

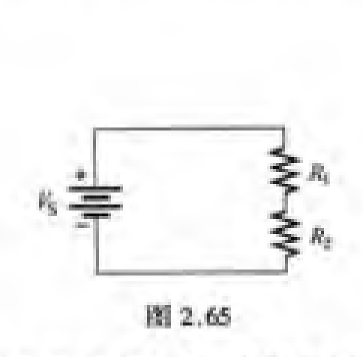


图2.65

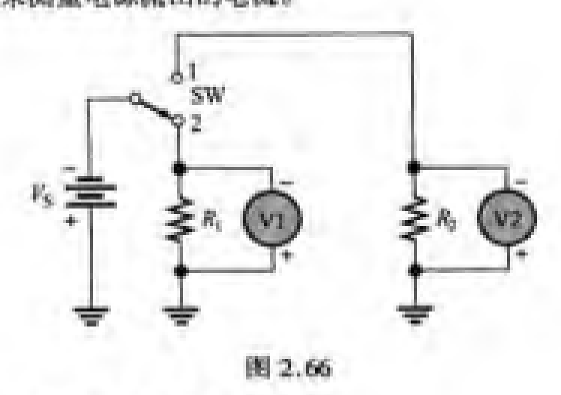


图2.66

31. 图2.63中，如何接入安培表可以测量通过每个电阻以及从电池流出的电流值？
32. 图2.63中，如何接入伏特表可以测量每个电阻的电压？
33. 图2.67(a)和2.67(b)中的电压读数为多少？
34. 图2.68中欧姆表所测量的电阻阻值为多少？
35. 根据下列欧姆表量程和读数确定电阻阻值。
   (a) 指针指到2，量程设置为×10
   (b) 指针指到15，量程设置为×100 000
   (c) 指针指到45，量程设置为×100



(a)



(b)

图 2.67



图 2.68

36. 在 $4\frac{1}{2}$ 数字万用表中，最高分辨率为多少？
37. 利用图 2.68 中的万用表来测量图 2.69 中的下列参量，分别说明需要用到万用表的哪一种功能并选择适当的量程。
    (a) I_1 (b) V_1 (c) R_1

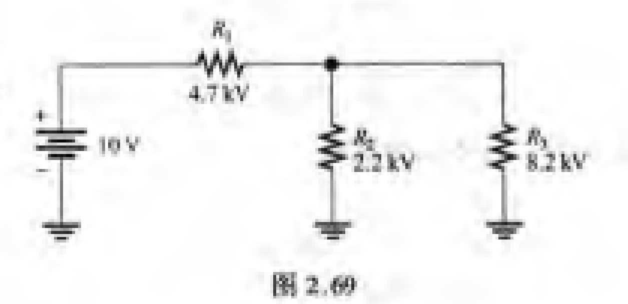


图 2.69

答案

2.1 节 原子结构

1. 电子是带负电荷的基本微粒。
2. 原子是一个元素中保留该元素特性的最小微粒。
3. 一个原子是由带正电的原子核以及核外电子所组成的。
4. 原子序数是原子核内质子的数量。
5. 不是，每一个元素都有不同类型的原子。
6. 自由电子是外层电子脱离原有原子束缚形成的。
7. 电子层是绕核旋转的电子轨道能量带。
8. 铜和银。

2.2 节 电荷

1. 电荷的符号为 Q。
2. 电荷的单位为库仑，库仑符号为 C。
3. 正负电荷是由于分别获得或失去外层(价)电子形成的。
4. $Q = \frac{10 \times 10^{12}}{6.25 \times 10^{18}/\text{C}} = 1.6 \times 10^{-6}\ \text{C} = 1.6\ \mu\text{C}$

2.3 节 电压

1. 电压是每单位电荷所带的能量。
2. 电压的单位是伏特。

3. $V = W/Q = 24\ \mathrm{J}/10\ \mathrm{C} = 2.4\ \mathrm{V}$
4. 电池、电源、太阳能电池和发电机都是电压源。

2.4 节　电流

1. 电流是电子移动的速率，单位是安培(A)。
2. 电子数/库仑 $= 6.25 \times 10^{18}$
3. $I = Q/t = 20\ \mathrm{C}/4\ \mathrm{s} = 5\ \mathrm{A}$

2.5 节　电阻

1. 电阻阻碍电流的通过，其单位是欧姆(Ω)。
2. 电阻器可以分为两种：定值电阻器和可变电阻器。前者的阻值是固定不变的，而后者的阻值是可以变化的。
3. 第一道色环：阻值的第一个有效数字。第二道色环：阻值的第二个有效数字。第三道色环：乘数(第二位有效数字后零的个数)。第四道色环：允许偏差%。
4. (a) 27 kΩ ± 10%　(b) 100 Ω ± 10%　(c) 5.6 MΩ ± 5%
   (d) 6.8 kΩ ± 10%　(e) 33 Ω ± 10%　(f) 47 kΩ ± 5%
5. 330 Ω：(b)，2.2 kΩ：(d)，56 kΩ：(e)，100 kΩ：(f)，39 kΩ：(a)
6. (a) 33R = 33 Ω　(b) 5K6 = 5.6 kΩ　(c) 900 = 900 Ω　(d) 6M8 = 6.8 MΩ
7. 变阻器有两个终端，电位器有三个终端。
8. 热敏电阻是一种温度感应电阻。

2.6 节　电路

1. 电路由电源、负载和电源与负载间的电流流通路径所组成。
2. 开路是电流没有流通路径的电路。
3. 闭合回路是具有完整电流流通路径的电路。
4. 开关打开阻值为无限大，开关闭合阻值为零。
5. 保险丝不能重新使用，断路器可以。
6. AWG 3 的直径较大。
7. 接地是一种常用参考点。

2.7 节　基本电路测量

1. (a) 安培表用来测量电流；
   (b) 伏特表用来测量电压；
   (c) 欧姆表用来测量电阻。
2. 答案参见图 2.70。

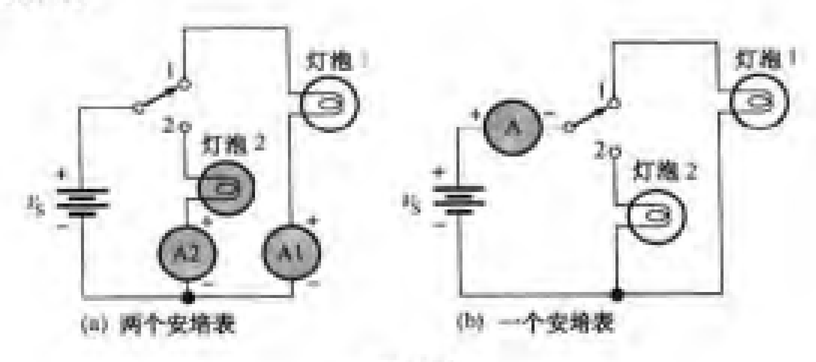


图 2.70

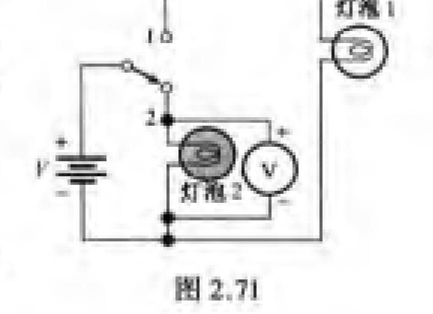


图 2.71

3. 答案参见图 2.71。
4. 数字万用表的显示类型有两种：液晶显示(LCD)和发光二极管显示(LED)。LCD 显示只需要很小的电流，但在光线很暗的情况下很难看清读数，且响应较慢。LED 显示可以在黑暗中读数且响应较快，然而相对于 LCD 显示需要较多的电流。
5. 分辨率是万用表可以测量的最小增量。
6. 1.5 V
7. 将量程设置为 600，读取中间一圈 AC-DC 刻度。刻度盘读数乘以 10 即可。
8. ×1000 挡

2.8 节　安全用电

1. 电流
2. 错
3. 错
4. 错
5. 对

技术实践

1. 电压减少导致灯光亮度降低，这是由于随着电压的减少电流也随之减少。
2. 降低电阻阻值可以使灯光亮度增加。

实例相关练习

2.1 1.88×10^{19}个电子
2.2 600 J
2.3 12 C
2.4 4700 Ω ± 5%
2.5 47.5 Ω ± 2%
2.6 1.25 kΩ
2.7 2.25 CM
2.8 4.61 kΩ
2.9 指针将向左移动到"70"处。

自测题

1.(b)　2.(a)　3.(c)　4.(c)　5.(b)　6.(b)　7.(c)　8.(d)
9.(b)　10.(b)　11.(c)　12.(b)　13.(b)　14.(c)

第3章 欧姆定律

引言

在第2章中我们介绍了电压、电流和电阻的概念,并介绍了基本电路。本章将会介绍电压、电流和电阻之间的关系,以及如何分析一个简单的电路。

欧姆定律是电路分析中最重要的工具。许多定律、定理和法则未必需要掌握,但我们必须学会和应用欧姆定律。

1826年,乔治·西蒙·欧姆发现电流、电压和电阻之间有一种特定的和可预测的关系。欧姆用一个公式表达这一关系,也就是今天的欧姆定律。本章将会介绍欧姆定律以及如何应用它来解决电路问题。本章还会介绍一种故障检修的普遍方法——分析、计划和量度(APM, analysis, planning, and measurement)法。

本章目标

- 解释欧姆定律
- 计算电路中的电流
- 计算电路中的电压
- 计算电路中的电阻
- 解释电路、电压和电阻的关系
- 介绍故障检修法

主要术语

- 欧姆定律
- 线性
- 故障检修

技术实践

本章中读者将会了解欧姆定律是如何在实际电路中应用的。对于一项工程开发实验室中的技术性工作,你的任务是改进现有的试验用具,使其能用于新的应用。这个试验用具是带有量程选择开关的电阻箱。你的工作是根据新的应用需求,确定和细分现有电路的必要变化。当然,经过调整后还需要进行测试来确定改装成功与否。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料,请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

3.1 欧姆定律

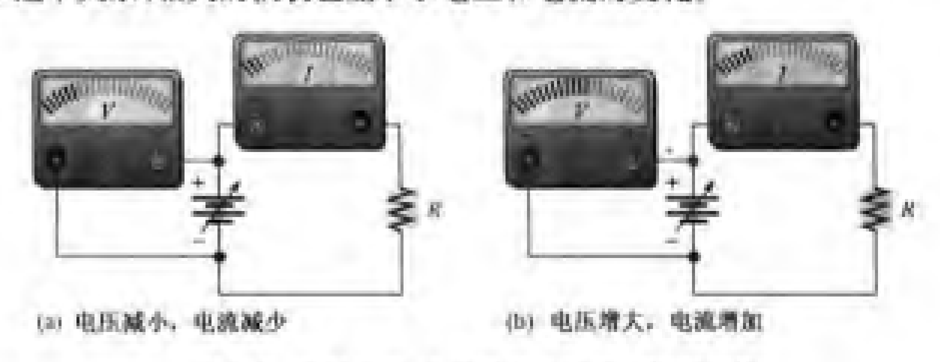
欧姆定律描述了电路中电压、电流和电阻的定量关系。根据所求量,欧姆定律可以有三种不同的公式表现形式。在这一节中,会分别介绍这些公式。

完成本节的学习后,读者应该能够:

- 解释欧姆定律

- 描述电压、电流和电阻的关系
- 电流作为电压和电阻的函数表示
- 电压作为电流和电阻的函数表示
- 电阻作为电压和电流的函数表示

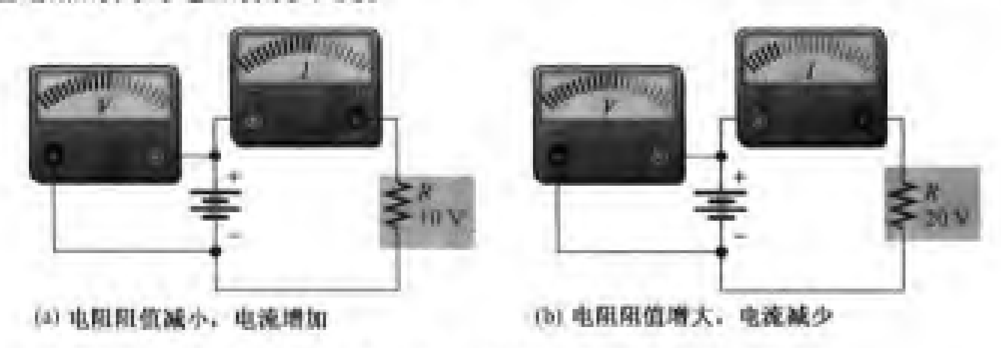
试验中假设电阻是固定的，那么如果电阻两端的电压变大，则通过电阻的电流也变大。同样，如果电压降低，电流也降低。如果电压加倍，电流也会加倍；如果电压减半，电流也会减半。图 3.1 表明了这个关系，相关的仪表也显示了电压和电流的变化。



(a) 电压减小，电流减少　　(b) 电压增大，电流增加

图 3.1 电阻不变，电流随着电压的变化而变化

欧姆定律也表明，如果电压不变，电阻变小导致电流变大。同样，电阻变大导致电流变小。如果电阻减半，电流会加倍；如果电阻加倍，电流会减半。图 3.2 中的仪表给出了这种情形，这个演示中电阻增加的同时电压保持不变。



(a) 电阻阻值减小，电流增加　　(b) 电阻阻值增大，电流减少

图 3.2 电压不变，电流随着电阻的变化而变化

3.1.1 电流公式

欧姆定律可以用以下公式表示：

$$I = \frac{V}{R} \tag{3.1}$$

这个公式对图 3.1 和图 3.2 中的电路进行了解释。电阻阻值不变，如果电压增加了，电流也会增加；如果电压降低了，电流也会减小。注意在式(3.1)中，如果电压固定，电阻增加，则电流减小。同样，如果电压固定，电阻下降，则电流增大。

采用式(3.1)，如果知道电压和电阻值，就能够计算电流。

3.1.2 电压公式

欧姆定律也可以用另一种方式来表述。将式(3.1)两边同时乘以 R 并交换等号左右两边，得到欧姆定律的一个等价形式。

$$V = IR \tag{3.2}$$

如果知道电流和电阻值，则能够用这个等式计算电压。

3.1.3 电阻公式

还有第三种等价形式用来表述欧姆定律。将式(3.2)两边同时除以 I 并交换等号左右两边，得到：

$$R = \frac{V}{I} \tag{3.3}$$

如果知道电压和电流值，可以用欧姆定律的这一形式确定电阻。

注意，式(3.1)、式(3.2)和式(3.3)都是等价的，只不过是欧姆定律的三种不同表达方式。

3.1 节练习

1. 欧姆定律定义了三个基本量之间是如何相关联的。这三个量是什么？
2. 写出欧姆定律的电流公式。
3. 写出欧姆定律的电压公式。
4. 写出欧姆定律的电阻公式。
5. 如果电阻阻值不变，电压增长了三倍，电流是增加还是减少？增加或减少了多少？
6. 如果电阻值不变，电压减半，电流如何变化？
7. 电压不变，测得通过一个电阻的电流为 1 A。如果将该电阻用阻值为其两倍的电阻替换，这时测得的电流是多少？
8. 在一个电路中，如果电压增加一倍，电阻减少一半。电流增加还是减少？增加或减少了多少？

3.2 计算电流

在这一节，读者将会学习知道电压和电阻阻值时，如何利用欧姆定律确定电流值。读者还会学到如何在电路计算中用国际单位词头表示这些量。

完成本节的学习后，读者应该能够：

- 计算一个电路中的电流。
- 已知电压和电阻值，利用欧姆定律确定电流。
- 用国际单位词头描述电压和电阻值。

下面的例子中会用到公式 $I = V/R$。为了获得以安培为单位的电流，必须以伏特为单位描述电压，以欧姆为单位描述电流。

例 3.1　求图 3.3 所示电路中通过的电流是多少？

解：利用公式 $I = V/R$，已知 $V = 100\ \text{V}$，$R = 22\ \Omega$。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{100\ \text{V}}{22\ \Omega} = \mathbf{4.55\ A}$$

电路中的电流为 4.55 A。

练习：如果图 3.3 中的 R 变为 33 Ω，电流是多少？

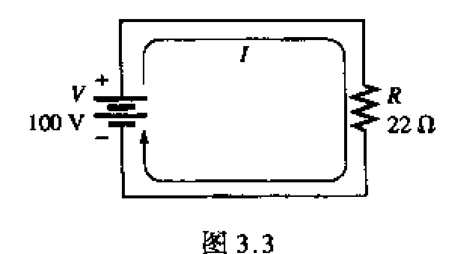


图 3.3

例 3.2 如果图 3.3 中的电阻变为 47 Ω,电压变为 50 V,电流是多少?

解: 将 $V = 50\ \text{V}, R = 47\ \Omega$ 替换到公式 $I = V/R$ 中。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{50\ \text{V}}{47\ \Omega} = \mathbf{1.06\ A}$$

练习: 如果 $V = 50\ \text{V}, R = 1000\ \Omega$,电流是多少?

3.2.1 较大的电阻单位(kΩ 和 MΩ)

电子学中,上千欧姆甚至上百万欧姆的电阻值是常见的。正如在第 1 章中所介绍的那样,大阻值的电阻是用国际单位词头中的 kilo(k)和 mega(M)表示的。因此,几千欧姆可以用千欧(kΩ)表示,几百万欧姆可以用兆欧(MΩ)表示。下面的例子阐明如何在计算电流时使用千欧和兆欧。

例 3.3 计算图 3.4 中的电流。

解: 记住 1.0 kΩ 与 $1 \times 10^3\ \Omega$ 等价。利用公式 $I = V/R$,已知 $V = 50\ \text{V}, R = 1 \times 10^3\ \Omega$。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{50\ \text{V}}{1.0\ \text{k}\Omega} = \frac{50\ \text{V}}{1 \times 10^3\ \Omega} = 50 \times 10^{-3}\ \text{A} = \mathbf{50\ mA}$$

练习: 如果 R 变为 10 kΩ,计算图 3.4 中的电流。

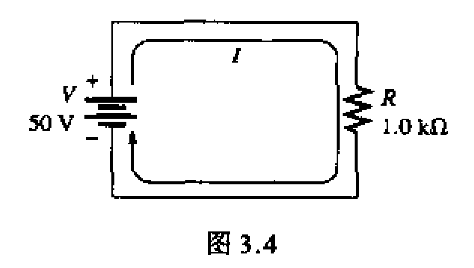


图 3.4

在例 3.3 中,50×10^{-3} A 表示为 50 mA。用伏特除以千欧时将会非常便利。电流将会以 mA 记,如例 3.4 所示。

例 3.4 图 3.5 电路中的电流是多少 mA?

解: 用电压除以 kΩ 计的阻值时,将会获得以 mA 记的电流。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{30\ \text{V}}{5.6\ \text{k}\Omega} = \mathbf{5.36\ mA}$$

练习: 如果电阻变为 2.2 kΩ,电流为多少 mA?

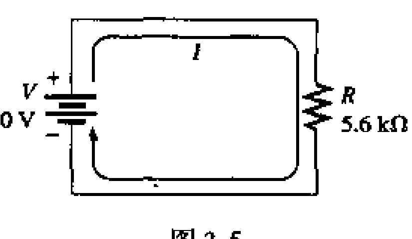
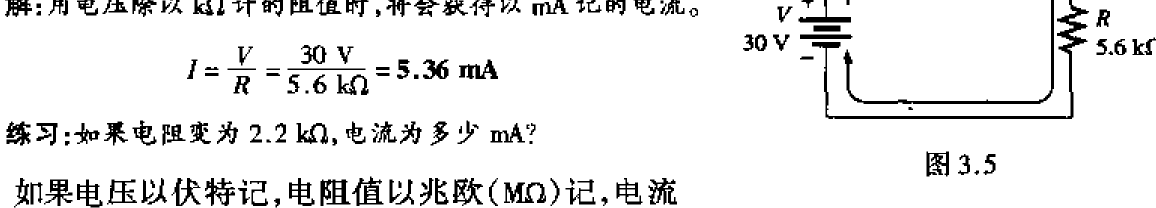


图 3.5



如果电压以伏特记,电阻值以兆欧(MΩ)记,电流以微安(μA)记,如例 3.5 和例 3.6 所示。

例 3.5 确定图 3.6 中电路的电流量。

解: 回想一下 4.7 MΩ 等于 $4.7 \times 10^6\ \Omega$。已知 $V = 25\ \text{V}, R = 4.7 \times 10^6\ \Omega$。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{25\ \text{V}}{4.7\ \text{M}\Omega} = \frac{25\ \text{V}}{4.7 \times 10^3\ \Omega} = 5.32 \times 10^{-6}\text{A} = \mathbf{5.32\ \mu A}$$

练习: 如果图 3.6 中的电压增至 100 V,电流是多少?

例 3.6 将图 3.6 中的 R 值变为 1.8 MΩ。电流是多少?

解: 如果用以 V 计的电压除以以 MΩ 计的阻值,则会得到以 μA 计的电流。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{25\ \text{V}}{1.8\ \text{M}\Omega} = \mathbf{13.9\ \mu A}$$

练习: 如果图 3.6 电路中的 R 增加一倍,电流是多少?

图 3.6

3.2.2 较大的电压单位(kV)

小电压(通常小于 50 V)在半导体电路中是常见的。然而半导体电路中偶尔也会有大电压。

例如，用于电视接收机的高压约为 20 000 V(20 kV)。电力公司的传送电压可能高达 345 000 V (345 kV)。下面的两个例子说明在计算电流时如何使用 kV 级别的电压值。

例 3.7 在 12 kΩ 的电阻上加 24 kV 的电压会产生多大的电流?

解: 因为千伏除以千欧，词头相消。因此，电流以安培记。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24\ \text{kV}}{12\ \text{k}\Omega} = \frac{24 \times 10^3\ \text{V}}{12 \times 10^3\ \Omega} = \mathbf{2\ A}$$

练习: 在 27 kΩ 的电阻上加 1 kV 的电压产生的电流是多少?

例 3.8 如果在 100 MΩ 的电阻上加 50 kV 的电压，有多大的电流通过该电阻?

解: 在本例中，用 100 MΩ 除以 50 kV 得到电流。用 50×10^3 V 替代 50 kV，用 $100 \times 10^6\,\Omega$ 替代 100 MΩ。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{50\ \text{kV}}{100\ \text{M}\Omega} = \frac{50 \times 10^3\ \text{V}}{100 \times 10^6\ \Omega} = 0.5 \times 10^{-3}\ \text{A} = \mathbf{0.5\ mA}$$

记住，分子中 10 的幂减去分母中 10 的幂。所以 50 除以 100，得 0.5；6 减去 3，得 10^{-3}。

练习: 10 kV 的电压加在 6.8 MΩ 的电阻上，通过电阻的电流为多少?

3.2 节练习

根据已知条件，计算习题 1.4 中的 I。

1. $V = 10$ V 和 $R = 5.6\ \Omega$。
2. $V = 100$ V 和 $R = 560\ \Omega$。
3. $V = 5$ V 和 $R = 2.2$ kΩ。
4. $V = 15$ V 和 $R = 4.7$ MΩ。
5. 如果给一个 4.7 MΩ 的电阻加 20 kV 的电压，求有多大的电流通过?
6. 在 2.2 kΩ 的电阻上加 10 kV 的电压，会产生多大的电流?

3.3 计算电压

在这一节里，读者将会学习知道电流值和电阻值时，如何利用欧姆定律确定电压值。读者还将学到如何在电路计算中利用国际单位词头表示这些量。

完成这一节的学习后，读者应该能够：

- 计算一个电路的电压。
- 已知电流值和电阻值，利用欧姆定律确定电压值。
- 利用国际单位词头表示电流值和电阻值。

在下面的例子里将用到公式 $V = IR$。为获得以伏特为单位的电压，必须将电流值用安培表示，电阻值用欧姆表示。

例 3.9 在图 3.7 所示的电路中，需要多大的电压才能产生 5 A 的电流?

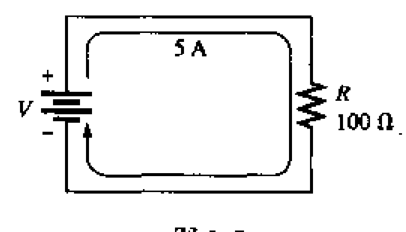


图 3.7

解: 在公式 $V = IR$ 中，已知 $I = 5$ A，$R = 100\ \Omega$。

$$V = IR = (5\ \text{A})(100\ \Omega) = \mathbf{500\ V}$$

因此，需要 500 V 的电压才能在 100 Ω 的电阻中产生 5 A 的电流。

练习: 在图 3.7 中，需要多少电压产生 12 A 的电流?

3.3.1 较小的电流单位(mA 和 μA)

下面两个例子说明在计算电压时如何使用以毫安(mA)和微安(μA)为单位的电流值。

例 3.10 图 3.8 中的电阻上将会测得多大的电压?

解:5 mA 等于 5×10^{-3} A。将公式 $V=IR$ 中的 I 和 R 用数值替代。

$$V=IR=(5\ \text{mA})(56\ \Omega)=(5\times10^{-3}\ \text{A})(56\ \Omega)=280\times10^{-3}\ \text{V}=\mathbf{280\ mV}$$

如果用 mA 乘以欧姆,则得到 mV。

练习:如果图 3.8 中 $R=33\ \Omega$,$I=1.5$ mA,加在 R 上的电压测得为多少?

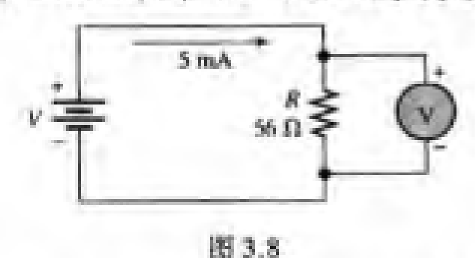


图 3.8

例 3.11 假设 8 μA 电流通过一个 10 Ω 的电阻,该电阻两端的电压是多少?

解:8 μA 等于 8×10^{-6} A。将公式 $V=IR$ 中的 I 和 R 用数值替代。

$$V=IR=(8\ \mu\text{A})(10\ \Omega)=(8\times10^{-6}\ \text{A})(10\ \Omega)=80\times10^{-6}\ \text{V}=\mathbf{80\ \mu V}$$

如果是 μA 乘以 Ω,得到 μV。

练习:要让 3.2 μA 的电流通过一个 47 Ω 的电阻,加在该电阻上的电压是多少?

这些例子已经说明,当用 mA 乘以 Ω 时得到 mV,当用 μA 乘以 Ω 时得到 μV。

3.3.2 较大的电阻单位(kΩ 和 MΩ)

下面两个例子说明在计算电压时如何使用以千欧(kΩ)和兆欧(MΩ)为数量级的电阻值。

例 3.12 图 3.9 所示电路中的电流为 10 mA,电压是多少?

解:10 mA 等于 10×10^{-3} A,3.3 kΩ 等于 3.3×10^{3} Ω。将这些值代到公式 $V=IR$ 中。

$$V=IR=(10\ \text{mA})(3.3\ \text{k}\Omega)=(10\times10^{-3}\ \text{A})(3.3\times10^{3}\ \Omega)=\mathbf{33\ V}$$

注意,10^{-3} 和 10^{3} 抵消。因此,相乘时 mA 抵消 kΩ,结果是 V。

练习:如果图 3.9 中的电流是 25 mA,电压是多少?



图 3.9

例 3.13 如果 50 μA 的电流通过一个 4.7 MΩ 的电阻,电压是多少?

解:50 μA 等于 50×10^{-6} A,4.7 MΩ 等于 4.7×10^{6} Ω。将这些值代入公式 $V=IR$ 中。

$$V=IR=(50\ \mu\text{A})(4.7\ \text{M}\Omega)=(50\times10^{-6}\ \text{A})(4.7\times10^{6}\ \Omega)=\mathbf{235\ V}$$

注意 10^{-6} 和 10^{6} 抵消,因此相乘时 μA 抵消 MΩ,结果是 V。

练习:如果 450 μA 通过一个 3.9 MΩ 的电阻,电压是多少?

3.3节练习

根据已知条件,计算习题1~习题7中的电压。

1. $I = 1$ A 和 $R = 10\ \Omega$
2. $I = 8$ A 和 $R = 470\ \Omega$
3. $I = 3$ mA 和 $R = 100\ \Omega$
4. $I = 25\ \mu$A 和 $R = 56\ \Omega$
5. $I = 2$ mA 和 $R = 1.8$ kΩ
6. $I = 5$ mA 和 $R = 100$ MΩ
7. $I = 10\ \mu$A 和 $R = 2.2$ MΩ
8. 需要多大的电压才能在4.7 kΩ的电阻中产生100 mA的电流?
9. 需要多大的电压才能在3.3 kΩ的电阻中产生3 mA的电流?
10. 一节电池输出2 A电流到一个6.8 Ω的电阻负荷,问电池的电压是多少?

3.4 计算电阻

在本节,读者将会学到在知道电流值和电压值时,如何用欧姆定律确定电阻值,还将学到在电路计算中如何利用国际单位词头表示的量。

完成本节的学习后,读者应该能够:

- 计算一个电路的电阻。
- 已知电压值和电流值时,利用欧姆定律确定电阻值。
- 利用以国际单位词头表示的电流和电压。

下面的例子运用公式 $R = V/I$。为获得以欧姆为单位的电阻,必须将电流值以安培为单位表示,电压以伏特为单位表示。

例3.14 图3.10所示的电路中,需要多大的电阻才能获得3.08 A的电流?

解:在公式 $R = V/I$ 中用12 V替代 V,用3.08 A替代 I。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12\text{ V}}{3.08\text{ A}} = \mathbf{3.90\ \Omega}$$

练习:在图3.10中,如果电流为5.45 A,R 值必须变为多少?

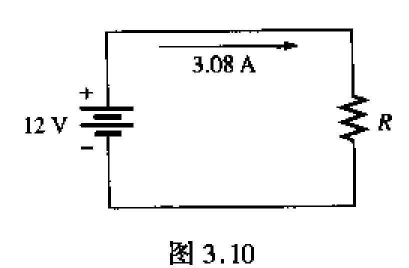


图3.10

3.4.1 较小的电流单位(mA和μA)

下面两个例子说明计算电阻时如何利用以mA和μA为单位的电流值。

例3.15 假设图3.11中的安培表读数为4.55 mA,伏特表读数为150 V,求 R 值是多少?

解:4.55 mA等于 4.55×10^{-3} A。将电压值和电流值代入公式 $R = V/I$ 中。

$$R = \frac{V}{I} = \frac{150\text{ V}}{4.55\text{ mA}} = \frac{150\text{ V}}{4.55 \times 10^{-3}\text{ A}} = 33 \times 10^{3}\ \Omega = \mathbf{33\ k\Omega}$$

用V除以mA,得到电阻值单位为kΩ。

练习:如果安培表显示1.10 mA,伏特表读数为75 V,R 值是多少?

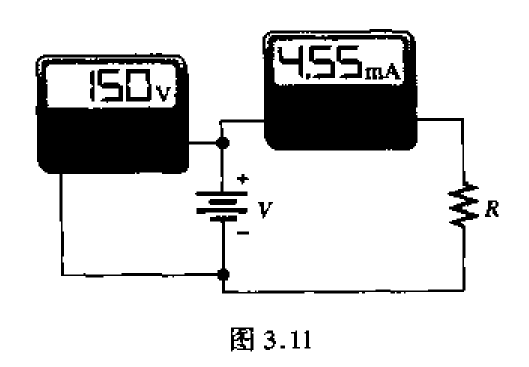


图 3.11

例 3.16 假设图 3.11 中的电阻值变化。如果电池电压仍然为 150 V,安培表读数为 68.2 μA,新电阻值为多少?

解:68.2 μA 等于 68.2×10^{-6} A。将 V 和 I 值替代到公式中得到 R。

$$R=\frac{V}{I}=\frac{150\ \text{V}}{68.2\ \mu\text{A}}=\frac{150\ \text{V}}{68.2\times10^{-6}\ \text{A}}=2.2\times10^{6}\ \Omega=\mathbf{2.2\ M\Omega}$$

V 被 μA 除,得到的电阻值单位为 MΩ。

练习:如果图 3.11 中的电阻变化,安培表读数为 45.5 μA,新电阻值是多少? 假设 $V=150$ V。

3.4 节练习

根据已知条件,求习题 1 ~ 习题 5 中的电阻 R。

1. $V=10$ V 和 $I=2.13$ A
2. $V=270$ V 和 $I=10$ A
3. $V=20$ kV 和 $I=5.13$ A
4. $V=15$ V 和 $I=2.68$ mA
5. $V=5$ V 和 $I=2.27$ μA
6. 一个电阻上测得的电压为 25 V,安培表读数为 53.2 mA。电阻值是多少 kΩ? 多少 Ω?

3.5 电流、电压和电阻的关系

欧姆定律描述了电流、电压和电阻之间的相互关系。电流和电压成正比,电流和电阻成反比。由于电压是"驱动力",故此作为一种资源时其数值不是由电阻决定的。如果作为一个压降,电流不变,电压直接与电阻成比例。

完成这一节的学习后,读者应该能够:

- 解释电流、电压和电阻的比例关系
- 用图形说明电流和电压的正比关系
- 用图形说明电流和电阻的反比关系
- 解释为什么电流和电压是成正比的

3.5.1 电流和电压的线性关系

在电阻电路中,电流和电压是线性成正比的。线性是指当电阻值不变时,如果其中的一个量以某种比例增加或减少,其他量将会以相同的比例增加或减少。例如,如果加在一个电阻上的电压增加 3 倍,电流也将增加 3 倍。

例 3.17　证明图 3.12 所示电路中的电压增加至原来的 3 倍，电流值也将增加 3 倍。

解：电压 10 V，电流是：

$$I = \frac{V}{R} = \frac{10\ \text{V}}{4.7\ \text{k}\Omega} = \mathbf{2.13\ mA}$$

如果电压增加至 30 V，电流将是：

$$I = \frac{V}{R} = \frac{30\ \text{V}}{4.7\ \text{k}\Omega} = \mathbf{6.38\ mA}$$

当电压增加 3 倍至 30 V 时，电流由 2.13 mA 增至 6.38 mA。

练习：如果图 3.12 中的电压增加 4 倍，电流是否也增加 4 倍？

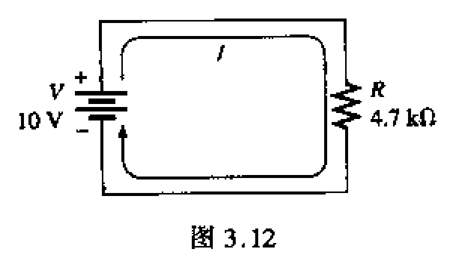
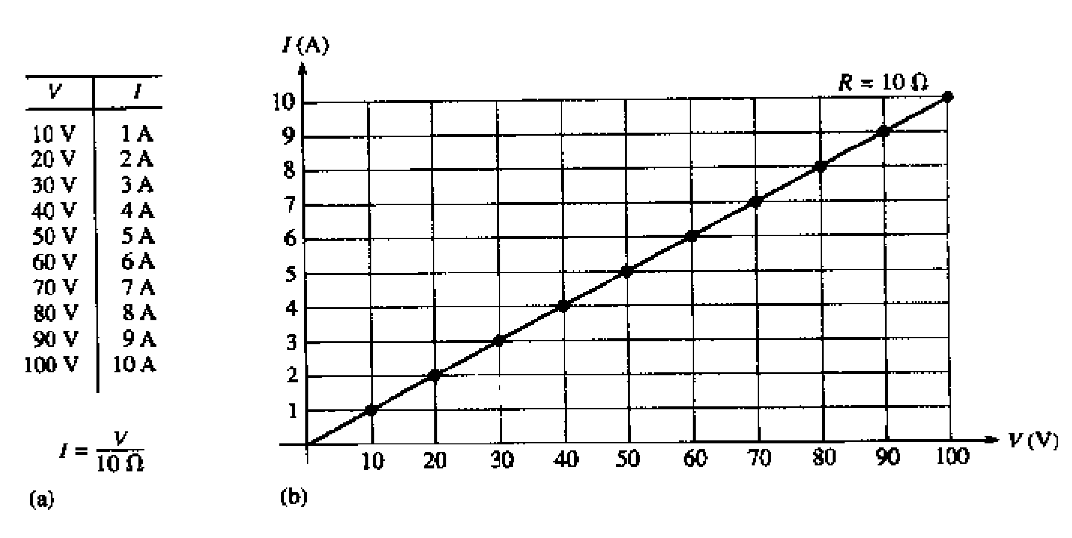


图 3.12

3.5.2　伏安特性曲线

我们假设电阻值不变，例如 10 Ω，计算从 10 V 到 100 V 范围内不同电压值的电流。图 3.13(a)显示了得到的电流值。图 3.13(b)显示了 I-V 图。注意这是一幅直线图。这幅图表明，电压的变化导致电流的线性变化。无论 R 值是多少，假设 R 值不变，则 I-V 图永远是一条直线。



V	I
10 V	1 A
20 V	2 A
30 V	3 A
40 V	4 A
50 V	5 A
60 V	6 A
70 V	7 A
80 V	8 A
90 V	9 A
100 V	10 A

$$I = \frac{V}{10\ \Omega}$$

(a)

图 3.13　$R = 10\ \Omega$ 的伏安特性曲线

例 3.18 说明了电阻电路中电压和电流之间线性关系的一个应用。

例 3.18　假设我们正在测量一个 25 V 电压下电路的电流。安培表的读数为 50 mA。然后，我们注意到电流下降至 40 mA。假设电阻没有发生变化，则只可能是电源电压发生了变化。求电压变化了多少？新的电压值是多少？

解：电流从 50 mA 下降至 40 mA，下降了 20%。因为电压和电流是线性相关的，所以电压与电流下降相同的百分比，即 25 V 的 20%，得到：

$$\text{电压的变化量} = (0.2)(25\ \text{V}) = \mathbf{5\ V}$$

从原来的电压中减去这个变化量得到新电压。

$$\text{新电压} = 25\ \text{V} - 5\ \text{V} = \mathbf{20\ V}$$

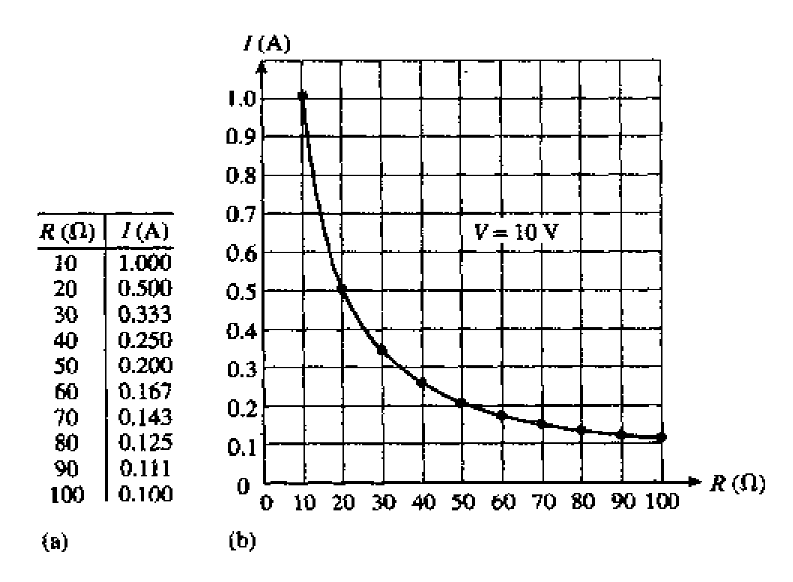
注意为找到新电压不需要电阻值。

练习：在这个例子中，如果在相同的条件下电流下降至 0 A，电压是多少？

3.5.3 电流和电阻成反比

正如你所见到的,欧姆定律的表述 $I=V/R$,表明电流与电阻成反比。电阻减少,电流上升;电阻增加,电流下降。例如,源电压不变,电阻减半,电流值增加一倍;电阻增加一倍,电流减半。

让我们选定一个固定电压值,例如 10 V,并计算从 10 Ω 到 100 Ω 范围内不同阻值的电流。图 3.14(a)显示了获得的不同值。图 3.14(b)显示了 *I-R* 图。



R (Ω)	I (A)
10	1.000
20	0.500
30	0.333
40	0.250
50	0.200
60	0.167
70	0.143
80	0.125
90	0.111
100	0.100

图 3.14 $V=10$ V 的 *I-R* 关系图

3.5 节练习

1. 线性相关的含义是什么?
2. 在一个电路中,$V=2$ V,$I=10$ mA。如果 V 变为 1 V,I 等于多少?
3. 如果在某一电压下 $I=3$ A,如果电压增加一倍,电流将会是多少?
4. 为在电路中将电流增加 50%,必须将一个 12 V 的电源增加多少伏?

3.6 故障检修介绍

技术人员必须能够诊断和修理发生故障的电路和系统。在这一节中,我们通过一个简单的例子来学习故障检修中的一种常规方法。故障检修是本书的重要部分之一,所以读者将会发现故障检修部分在许多章节和故障检修测试、故障检修问题中出现,故障检修也要求熟练运用 EWB/Multisim 设计电路。

完成这一节学习后,读者应该能够:

- 描述一种故障检修的基本方法
- 列出故障检修的三个步骤
- 解释什么是半分法
- 论述并比较电压、电流和电阻这三个基本量的测量

故障检修是将电路或系统运作的全面知识与逻辑思维相结合来解决电路或系统故障的过程。故障检修的基本方法包括三个步骤:分析、计划和测量,简称 APM。

3.6.1 分析

对于一个电路的故障检修，第一步是分析失败的线索和表征。分析可从确定某些问题的答案开始。

1. 电路曾经正常运行吗？
2. 如果电路曾经正常运行过，那么在哪些情况下电路不能正常运行？
3. 不正常运行的表征是什么？
4. 不正常运行的可能原因是什么？

3.6.2 计划

分析线索之后，故障检修的第二步是制订一个逻辑计划。合理的计划将会节约大量时间。电路的工作原理是故障检修计划的一个先决条件。如果不能确定电路是如何工作的，就需要花些时间回顾电路图(图表)、操作命令和其他有关的信息。此时，一幅在不同测试点处适当标注电压的图表是非常有用的。尽管进行逻辑思考可能是故障检修中最重要的，但是仅仅通过思考是很难解决问题的。

3.6.3 测量

第三步是通过对测量点的仔细推理缩小发生故障的可能范围。这些测量点通常决定了解决问题时选择的方向，或者会指出一个新的方向。偶尔我们可能会发现一个完全出乎意料的结果。

3.6.4 一个例子

推理过程是 APM 方法的一部分，可以用一个简单的例子来说明。假设有 8 盏装饰灯，串连在一个 120 V 的电源上，如图 3.15 所示。假设这个电路曾经正常工作过，但移到一个新地方后却不能再良好地工作了——插上电时，灯不亮了。如何找出存在的问题？

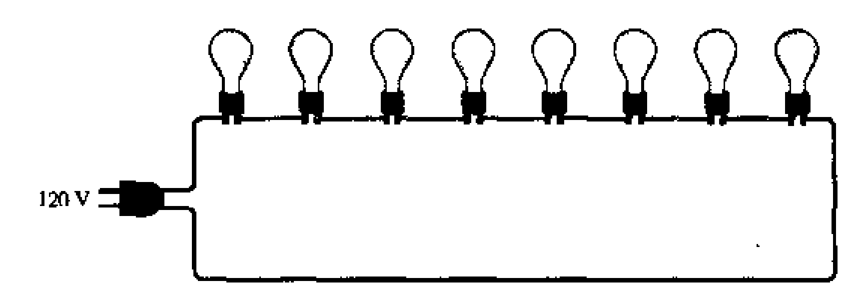


图 3.15 一串灯泡连接到一个电源上

分析推理过程 当我们分析上述情况时，可能会这样想：

- 因为电路在挪动以前正常工作过，问题可能是新地方没有电压。
- 可能导线在挪动时松了或是拉断了。
- 可能灯泡烧毁了，或是螺丝口松了。

我们已经考虑了可能的原因和可能发生的故障，那么推理过程继续：

■ 电路曾经正常工作过的事实排除了原电路没有良好导通的可能。
■ 如果故障原因是由于开路,但一个错误的连接或者一个烧毁的灯泡导致一处以上的断开可能性很小。

现在已经分析了问题,并准备计划故障查找过程。

计划推理过程 计划的第一部分是测量新地方的电压。如果有电压,则问题存在于这串灯泡中。如果没有电压,检查屋内配电箱的断路器。在将断路器复位以前,我们必须考虑为什么断路器会脱开。假设发现有电压,这意味着问题出在灯泡上。

计划的第二部分是测量这串灯泡的电阻或者灯泡两端的电压。在哪部分测量电阻或电压由测试的难易程度来决定。在故障检修的完整计划中,不可能考虑到所有的偶然事件。所以在实际操作时,需要经常性地修正计划。

测量过程 我们已经进行了计划的第一部分,现在用万用表测量新地方的电压。假设测量显示电压为 120 V,则可以排除没有电压的可能性。在这串灯泡的两端加上电压时,由于没有灯泡亮,由此确定在电路中必有一处断开。其原因不是一个灯泡被烧毁,灯泡螺口处没拧紧,就是导线断开了。

接下来通过万用表测量电阻找出断开的位置。应用逻辑推理,先将这串灯泡分为两半,只需要测量每一半的电阻,而不用测量每个灯泡的电阻。通过一次测量一半灯泡的电阻,可能会减少寻找断路所需的工作量。这种技术是一种常见的故障检修程序,称为半分法。

发生断路的那一半电阻应该是无限大。然后,在发生断路的一半中再利用半分法,并继续直到将错误缩小到一个故障的灯泡或一个连接上。图 3.16 显示了这一过程,在图中,为阐述的需要,假设第七个灯泡被烧毁。

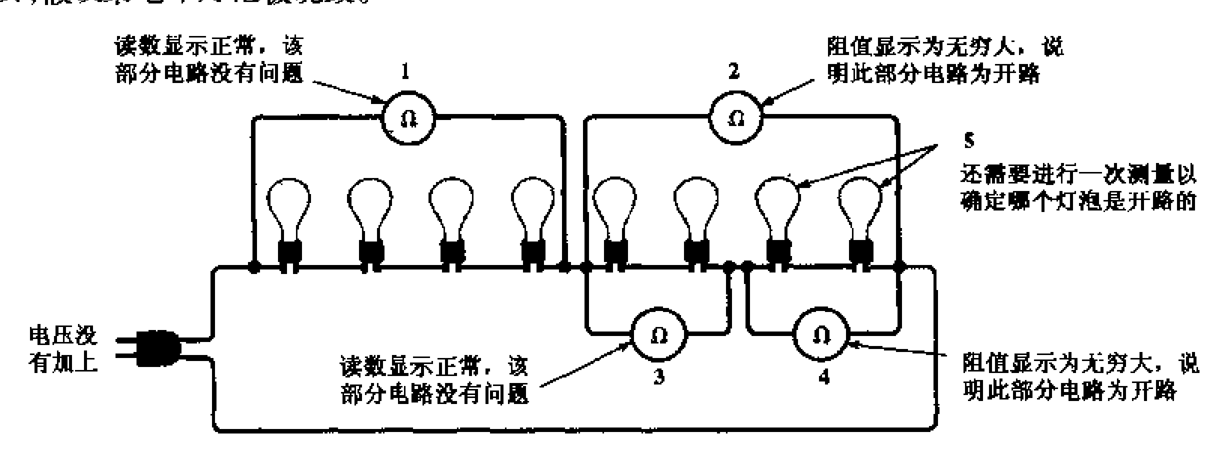


图 3.16 半分法故障检修过程的说明(标号是万用表从一个位置移到另一个位置的顺序说明)

如图所示,在这个例子中,采用半分法只进行了五次测量来识别出故障的灯泡。如果从左开始逐一测量每个灯泡,可能需要测量七次。因此,有时候半分法可以节省测量步骤;但也有时候不能。步骤的数量取决于在哪里测量和以什么顺序测量。

遗憾的是,大部分故障检修的复杂程度远远超过了这个例子。然而,分析和计划对于在任何情况下进行有效的故障检修都是非常重要的。由于要测量,常常需要修改计划,所以有经验的故障检修员可以通过将表征和测量点联系到可能的故障原因中来缩小搜寻范围。

3.6.5 V,R和I测量法的比较

在2.7节中我们讲到了如何测量一个电路中的电压、电流或电阻。测量电压,是将伏特表并联在被测元件两端,也就是将伏特表的两个接头分别置于元件的两端。所以,电压的测量是三种测量中最简单的一种。

测量电阻,同样需要将欧姆表并联在电阻两端。但首先需要断开电压,而且有时必须把元件从电路中移除。因此,电阻的测量比电压的测量稍微困难一些。

测量电流要将安培表与元件串联,也就是说安培表必须在电路中。在连接安培表之前必须断开一个元件接头或一段导线。这使得电流的测量通常是最困难的。

3.6节练习

1. 列出故障检修APM方法的三个步骤。
2. 解释半分法的基本技术原理。
3. 为什么在一个电路中电压比电流更容易测量?

技术实践

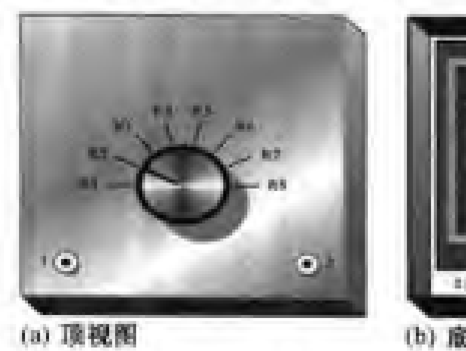
在本次技术实践中,作为实验室一项测试计划的一部分,我们准备测试和改进一个现有电阻箱。任务是改进电路以符合新应用的要求。需要应用欧姆定律的知识来完成这一工作。

具体要求如下:

1. 每个电阻是通过开关调节的,并且一次只能选择一个电阻。
2. 电阻阻值最低的是10 Ω。
3. 开关顺序中,任何两个连续的量程间,阻值高一挡的量程是阻值低一挡量程的10倍。
4. 最大电阻的阻值是1.0 MΩ。
5. 加在电阻箱中任何一个电阻上的最大电压为4 V。
6. 需要两个额外的电阻。一个用来将电流限制在10 mA ± 10%,另一个将电流限制在5 mA ± 10%,并形成4 V的压降。

现有的电阻电路

图3.17显示了现有电阻箱的顶视图和底视图,开关是旋转式的。



(a) 顶视图



(b) 底视图

图3.17 现有的电阻箱

原理图

- 从图3.17中确定电阻阻值并画出现有电路的原理图。用电阻箱顶视图的R编号确定电阻编号。

新要求的原理图

- 画出一幅能够达到以下要求的电路原理图。

1. 电阻箱上的"1"和"2"端，通过开关每次只能与一个电阻相连。
2. 提供一个选择开关使电阻的阻值以 10 倍的增幅由 10 Ω 增加至 1.0 MΩ。
3. 每个电阻必须能由一系列按升序排列的邻近开关所选择。
4. 必须有两个可调节开关的电阻器。一个在开关位置 1 处[如图 3.17(b)所示]，必须将电流限制于 10 mA ± 10%，并产生 4 V 的压降。另一个在开关位置 8 处，必须将电流限制于 5 mA ± 10%，并产生 4 V 的压降。
5. 所有电阻器必须是允许偏差为 10% 的标准值。

- 确定符合要求的、对现有电路板的改进方案，并列出改进方案的详细列表，包括电阻值、接线和新元件。此外，应该对原理图中的每个点给出标号以便参考。

测试程序

- 改装后的电阻箱是否符合说明要求，必须通过测试才能看出来其是否正确工作。请确定如何测试电阻箱并确定需要使用哪些仪器。一步一步详细说明你的测试程序。

电路中的故障检修

- 当欧姆表的两端连在电阻箱的 1 和 2 处，确定下列情况下最可能的错误是什么。

1. 当旋转开关置于 3 处，欧姆表读数为无限大。
2. 开关旋转到任何位置，欧姆表显示都为无限大。
3. 开关置于 6 的位置上时，欧姆表显示错误的阻值。

技术实践练习

1. 解释在这次应用任务中你是如何应用欧姆定律的。
2. 加上 4 V 电压后，确定通过每个电阻的电流。

小结

- 电压和电流是线性成比例的。
- 欧姆定律给出了电压、电流和电阻间的相互关系。
- 电流与电压成正比。
- 电流与电阻成反比。
- 一千欧(kΩ)是一千欧姆。
- 一兆欧(MΩ)是一百万欧姆。
- 一微安(μA)是百万分之一安培。
- 一毫安(mA)是千分之一安培。
- 计算电流时使用 $I = V/R$。
- 计算电压时使用 $V = IR$。
- 计算电阻时使用 $R = V/I$。
- 图 3.18 是欧姆定律中三者关系的辅助记忆图。

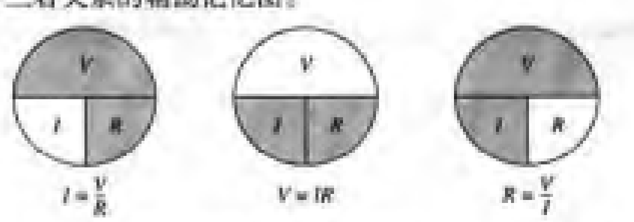


图 3.18 欧姆定律中电流、电压和电阻关系的辅助记忆图

主要术语

线性：相互关系成直线关系的特性。

欧姆定律：阐述了电流与电压成正比，而与电阻成反比的定律。

故障检修：一种隔离、识别和解决电路或系统故障的系统分析方法。

公式

3.1 $I=\frac{V}{R}$ 欧姆定律的电流公式

3.2 $V=IR$ 欧姆定律的电压公式

3.3 $R=\frac{V}{I}$ 欧姆定律的电阻公式

自测题

1. 下列阐述符合欧姆定律的是：
   (a) 电流等于电压乘以电阻
   (b) 电压等于电流乘以电阻
   (c) 电阻等于电流除以电压
   (d) 电压等于电流的平方乘以电阻
2. 当加在电阻两端的电压加倍时，电流将：
   (a) 变为原来的三倍 (b) 减半 (c) 加倍 (d) 不变
3. 将 10 V 电压加在 20 Ω 电阻两端时，电流为：
   (a) 10 A (b) 0.5 A (c) 200 A (d) 2 A
4. 如果有 10 mA 的电流通过 1.0 kΩ 的电阻，则电阻两端的电源为：
   (a) 100 V (b) 0.1 V (c) 10 kV (d) 10 V
5. 如果 20 V 的电压加在电阻两端，通过电阻的电流为 6.06 mA，电阻阻值为：
   (a) 3.3 kΩ (b) 33 kΩ (c) 330 Ω (d) 3.03 kΩ
6. 通过 4.7 kΩ 电阻的电流为 250 μA，其压降为：
   (a) 53.2 V (b) 1.18 mV (c) 18.8 V (d) 1.18 V
7. 一个 2.2 MΩ 电阻与 1 kV 电源相连，得到的电流近似为：
   (a) 2.2 mA (b) 0.455 mA (c) 45.5 μA (d) 0.455 A
8. 电阻为多大时可以将 10 V 的电池流出的电流限制为 1 mA?
   (a) 100 Ω (b) 1.0 kΩ (c) 10 Ω (d) 10 kΩ
9. 一个电暖气从 110 V 的电源中获得 2.5 A 的电流，电暖气的电阻为：
   (a) 275 Ω (b) 22.7 mΩ (c) 44 Ω (d) 440 Ω
10. 如果通过手电筒灯泡的电流为 20 mA，而总电池的电压为 4.5 V，灯泡电阻为：
    (a) 90 Ω (b) 225 Ω (c) 4.44 Ω (d) 45 Ω

故障检修测验

1. 通过一个定值电阻的电流从 10 mA 增加到 12 mA 时，电阻两端的电压将：
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变
2. 加在一个定值电阻两端的电压从 10 V 降到 7 V 时，通过电阻的电流将：
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变
3. 如果一个可变电阻两端的电压为 5 V，当其电阻变小时，通过电阻的电流将：
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变

4. 如果加在电阻两端的电压从 5 V 升到 10 V,且电流从 1 mA 增加到 2 mA,则电阻将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变

参见图 3.11

5. 如果伏特表的读数变为 175 V,安培表的读数将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c)保持不变
6. 如果电阻 R 的值增加,电压仍然保持 150 V,电流将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c)保持不变
7. 如果将电阻从电路中移除形成开路,安培表的读数将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变
8. 如果将电阻从电路中移除形成开路,伏特表的读数将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变

参见图 3.19

9. 如果调节变阻器增加电阻阻值,则通过发热器的电流将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变
10. 如果调节变阻器增加电阻阻值,则电源电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变
11. 如果保险丝断开,则发热器两端的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变
12. 如果电源电压上升,则电热器两端的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变
13. 如果更换一个具有较高额定值的保险丝,则通过变阻器的电流将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变

参见图 3.21

14. 如果灯泡烧坏(开路),电流将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变
15. 如果灯泡烧坏,灯泡两端的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变

习题(带星号的题目较难,奇数序号的题目答案在本书末尾)

3.1 节 欧姆定律

1. 在由一个电压源和一个电阻组成的电路中,描述什么情况下电流发生下列变化。
   (a) 电压变为 3 倍
   (b) 电压缩小 75%
   (c) 电阻加倍
   (d) 电阻缩小 35%
   (e) 电压加倍而电阻减半
   (f) 电压加倍,电阻也加倍
2. 说明已知 V 和 R,求 I 的公式。
3. 说明已知 I 和 R,求 V 的公式。
4. 说明已知 V 和 I,求 R 的公式。

3.2 节 计算电流

5. 确定下列情况下的电流。
   (a) $V=5\ \text{V}, R=1.0\ \Omega$ (b) $V=15\ \text{V}, R=10\ \Omega$

(c) $V = 50\text{ V}, R = 100\ \Omega$　　(d) $V = 30\text{ V}, R = 15\text{ k}\Omega$

(e) $V = 250\text{ V}, R = 5.6\text{ M}\Omega$

6. 确定下列情况下的电流：

(a) $V = 9\text{ V}, R = 2.7\text{ k}\Omega$　　(b) $V = 5.5\text{ V}, R = 10\text{ k}\Omega$

(c) $V = 40\text{ V}, R = 68\text{ k}\Omega$　　(d) $V = 1\text{ kV}, R = 2.2\text{ k}\Omega$

(e) $V = 66\text{ kV}, R = 10\text{ M}\Omega$

7. 一个 10 Ω 电阻连接在一个 12 V 的电池两端，通过电阻的电流为多少？

8. 一个定值电阻的色环为橙、橙、红和金。当电阻与 12 V 电源相连时，确定通过电阻的最大和最小电流是多少？

9. 一个电阻连接在 25 V 电源的两端，如果电阻的色环为黄、紫、橙和银，求通过电阻的电流为多少？

*10. 将电位器作为变阻器使用，如图 3.19 所示连接，变阻器用来控制通过发热器的电流。当变阻器调节到阻值为 8 Ω 或更小时，发热器将被烧坏。如果在发热器通过最大电流时加在其两端的电压为 100 V，且变阻器两端的电压与电源电压和发热器电压不同，求为保护电路需要多大额定值的保险丝？

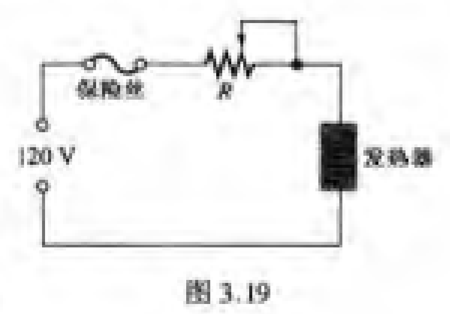


图 3.19

3.3 节　计算电压

11. 已知 I 和 R 如下，计算电压。

(a) $I = 2\text{ A}, R = 18\ \Omega$　　(b) $I = 5\text{ A}, R = 56\ \Omega$

(c) $I = 2.5\text{ A}, R = 680\ \Omega$　　(d) $I = 0.6\text{ A}, R = 47\ \Omega$

(e) $I = 0.1\text{ A}, R = 560\ \Omega$

12. 已知 I 和 R 如下，计算电压。

(a) $I = 1\text{ mA}, R = 10\ \Omega$　　(b) $I = 50\text{ mA}, R = 33\ \Omega$

(c) $I = 3\text{ A}, R = 5.6\text{ k}\Omega$　　(d) $I = 1.6\text{ mA}, R = 2.2\text{ k}\Omega$

(e) $I = 250\ \mu\text{A}, R = 1.0\text{ k}\Omega$　　(f) $I = 500\text{ mA}, R = 1.5\text{ M}\Omega$

(g) $I = 850\ \mu\text{A}, R = 10\text{ M}\Omega$　　(h) $I = 75\ \mu\text{A}, R = 47\ \Omega$

13. 一个 27 Ω 电阻与电压源相连，通过的电流为 3 A，求电源的电压为多少？

14. 指定图 3.20 中使各个电路获得相应电流的电压值为多少？

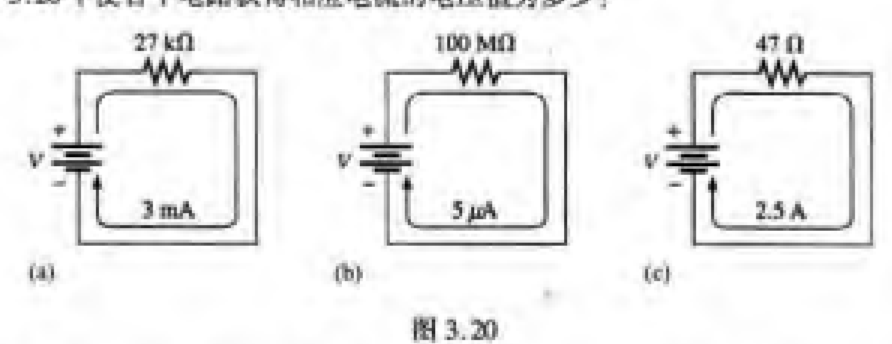


图 3.20

*15. 一个 6 V 的电源通过规格为 18 的铜导线与一个 100 Ω 的电阻相连，总阻值是通过导线的阻值与 100 Ω 电阻阻值相加得到的。求下列值：

(a) 电流　　(b) 电阻上的压降　　(c) 导线两端的压降

3.4 节　计算电阻

16. 已知 V 和 I 如下，计算变阻器的阻值。

(a) $V = 10$ V, $I = 2$ A　(b) $V = 90$ V, $I = 45$ A　(c) $V = 50$ V, $I = 5$ A
(d) $V = 5.5$ V, $I = 10$ A　(e) $V = 150$ V, $I = 0.5$ A

17. 已知 V 和 I 如下,计算变阻器的阻值。
(a) $V = 10$ kV, $I = 5$ A　(b) $V = 7$ V, $I = 2$ mA
(c) $V = 500$ V, $I = 250$ mA　(d) $V = 50$ V, $I = 500$ μA
(e) $V = 1$ kV, $I = 1$ mA

18. 在电阻两端加上 6 V 电压,通过电阻的电流为 2 mA,求电阻的阻值为多少?

19. 图 3.21(a)中灯泡的灯丝具有一定的阻值,将其用一个等效电阻表示,如图 3.21(b)所示。如果灯泡的工作电压为 120 V,通过的电流为 0.8 A,则灯泡发光时其阻值为多少?

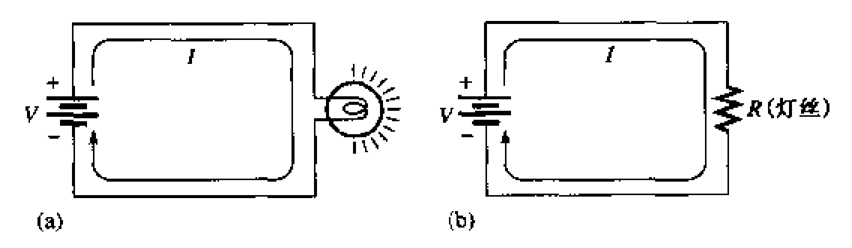


图 3.21

20. 如果一个电气器件的阻值未知,给你一个 12 V 的电池和一个安培表,如何确定未知电阻的阻值?画出电路连接图。

21. 通过图 3.22 中变阻器(可变电阻器)的变化,可以改变电流的大小。如果现在的设置使通过变阻器的电流为 750 mA,则此时变阻器的阻值为多少?如果经过调节后电流上升到 1 A,则变阻器的阻值又变为多少?这个电路存在的问题是什么?

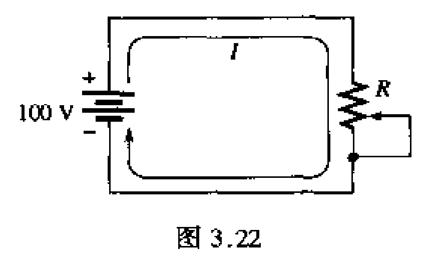


图 3.22

*22. 一个 120 V 的照明电路的灯光亮度是通过一个变阻器来控制的,其电流过载保护是通过一个 2 A 的保险丝实现的。求在不烧断保险丝的情况下,变阻器的最小阻值为多少?(假设灯泡的电阻为 15 Ω。)

3.5 节　电流、电压和电阻的关系

23. 一个可变电压源的连接如图 3.23 所示。其起始电压为 0 V,然后以10 V 为增量逐渐增加到 100 V。确定每个电压对应的电流值,画出 V 与 I 的伏安特性曲线,问其是否为直线?这说明了什么?

24. 电路中,当 $V = 1$ V 时,$I = 5$ mA,确定相同电路中的电压取下列数值时所对应的电流值。
(a) $V = 1.5$ V　(b) $V = 2$ V　(c) $V = 3$ V　(d) $V = 4$ V　(e) $V = 10$ V

25. 图 3.24 中是三个电阻的电压与电流关系曲线图,确定 R_1, R_2 和 R_3。

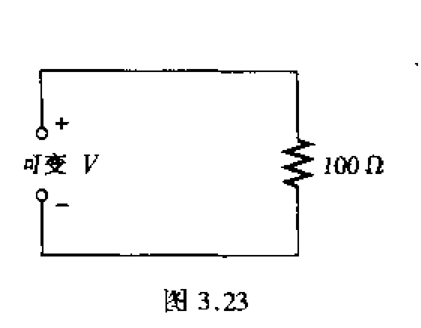


图 3.23

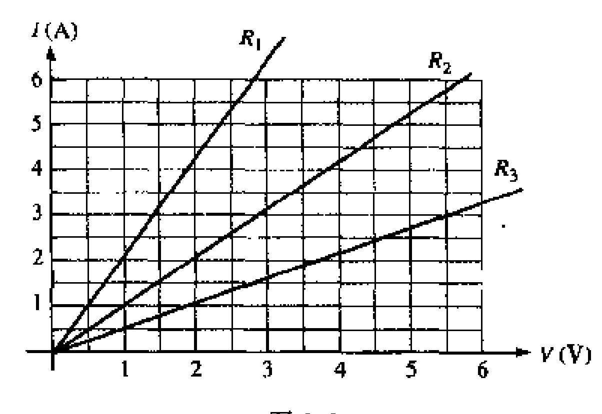


图 3.24

26. 图 3.25 中哪个电路的电流最大？哪个最小？

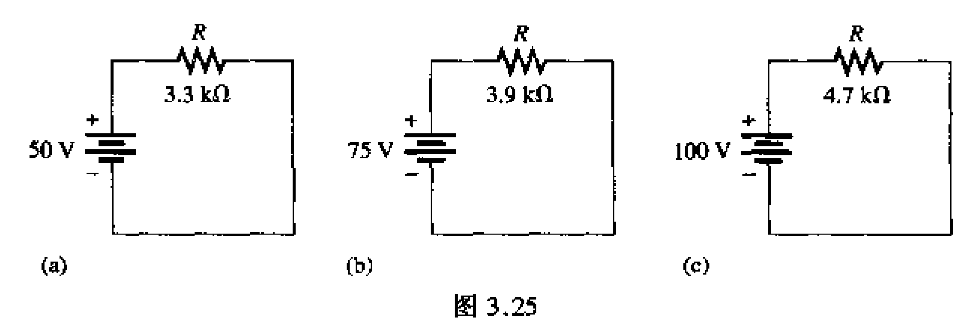


图 3.25

*27. 在 10 V 电池下测量电路电流，安培表的读数为 50 mA。随后，你注意到电流下降到 30 mA。排除电阻阻值变化的可能，则一定是电压改变了。电池的电压改变了多少，新的数值是多少？

*28. 如果希望通过改变 20 V 电源的电压使通过电阻的电流从 100 mA 变化到 150 mA，则电源电压将改变多少伏特？新的数值为多少？

29. 电压值从 10 V 到 100 V 以 10 V 为增量取点，画出下列电阻阻值下的伏安特性曲线。

(a) 1.0 Ω (b) 5.0 Ω (c) 20 Ω (d) 100 Ω

3.6 节 故障检修介绍

30. 图 3.26 所示的照明电路中，根据以下欧姆表的读数辨认出损坏的灯泡。

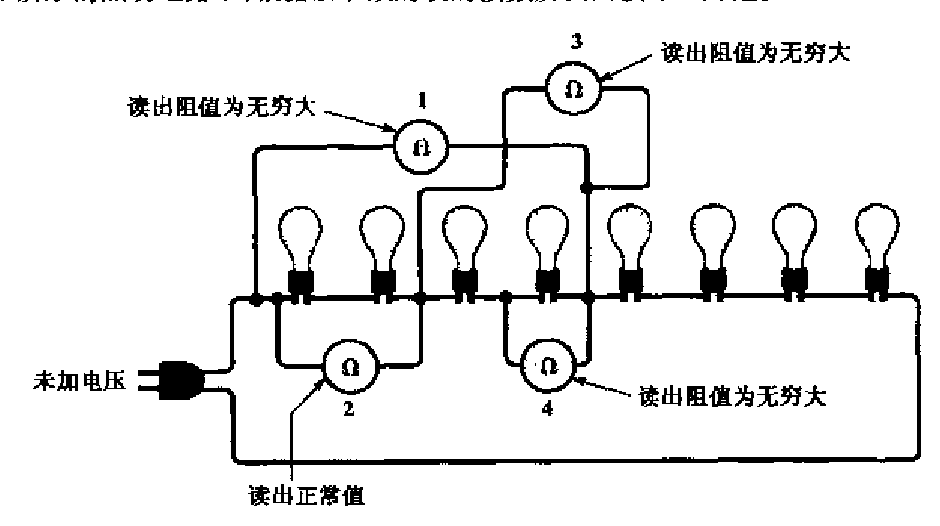


图 3.26

31. 假设在一串 32 个灯泡中有一个灯泡损坏，从电路左半边开始利用半分法逐渐接近，进而确定损坏灯泡。如果损坏的灯泡是从左边数第 17 个，则需要测量多少个电阻才能找到它？记住，你不知道损坏的灯泡是哪一个。

EWB/Multisim 故障检修

这些题目需要本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

32. 打开 EWB 光盘的文件 P03-32，确定三个电路中的哪一个没有正常工作？

33. 打开文件 P03-33 并确定电阻器的阻值。

34. 打开文件 P03-34 并确定电流和电压值。

35. 打开文件 P03-35 并确定电源电压和电阻的阻值。

36. 打开文件 P03-36 并找出电路中的问题。

答案

3.1 节 欧姆定律

1. 电流、电压和电阻
2. $I = V/R$
3. $V = IR$
4. $R = V/I$
5. 当电压变为 3 倍时,电流也相应增加为原来的 3 倍。
6. 当电压减半时,电流也变为原来电流值的一半。
7. 0.5 A
8. 如果电压加倍,电阻阻值减半,则电流增加为原来的 4 倍。

3.2 节 计算电流

1. $I = 10\ \text{V}/5.6\ \Omega = 1.79\ \text{A}$
2. $I = 100\ \text{V}/560\ \Omega = 179\ \text{mA}$
3. $I = 5\ \text{V}/2.2\ \text{k}\Omega = 2.27\ \text{mA}$
4. $I = 15\ \text{V}/4.7\ \text{M}\Omega = 3.19\ \mu\text{A}$
5. $I = 20\ \text{kV}/4.7\ \text{M}\Omega = 4.26\ \text{mA}$
6. $I = 10\ \text{kV}/2.2\ \text{k}\Omega = 4.55\ \text{A}$

3.3 节 计算电压

1. $V = (1\ \text{A})(10\ \Omega) = 10\ \text{V}$
2. $V = (8\ \text{A})(470\ \Omega) = 3.76\ \text{kV}$
3. $V = (3\ \text{mA})(100\ \Omega) = 300\ \text{mV}$
4. $V = (25\ \mu\text{A})(56\ \Omega) = 1.4\ \text{mV}$
5. $V = (2\ \text{mA})(1.8\ \text{k}\Omega) = 3.6\ \text{V}$
6. $V = (5\ \text{mA})(100\ \text{M}\Omega) = 500\ \text{kV}$
7. $V = (10\ \mu\text{A})(2.2\ \text{M}\Omega) = 22\ \text{V}$
8. $V = (100\ \text{mA})(4.7\ \text{k}\Omega) = 470\ \text{V}$
9. $V = (3\ \text{mA})(3.3\ \text{k}\Omega) = 9.9\ \text{V}$
10. $V = (2\ \text{A})(6.8\ \Omega) = 13.6\ \text{V}$

3.4 节 计算电阻

1. $R = 10\ \text{V}/2.13\ \text{A} = 4.7\ \Omega$
2. $R = 270\ \text{V}/10\ \text{A} = 27\ \Omega$
3. $R = 20\ \text{kV}/5.13\ \text{A} = 3.9\ \text{k}\Omega$
4. $R = 15\ \text{V}/2.68\ \text{mA} = 5.6\ \text{k}\Omega$
5. $R = 5\ \text{V}/2.27\ \mu\text{A} = 2.2\ \text{M}\Omega$
6. $R = 25\ \text{V}/53.2\ \text{mA} = 0.47\ \text{k}\Omega = 470\ \Omega$

3.5 节 电流、电压和电阻的关系

1. 线性比例意味着两个量的变化百分比相同。
2. $I = 5\ \text{mA}$

3. $I=6$ A
4. $\Delta V=6$ V

3.6节 故障检修介绍

1. 分析、计划和测量。
2. 半分法通过将电路中待检测元件数量减半来逐步分离出损坏元件。
3. 并联在元件两端测量电压,与元件串联测量电流。

技术实践

1. 确定新的电阻,$R=V/I$。
2. $I=4$ V/10 Ω = 400 mA; $I=4$ V/100 Ω = 40 mA; $I=4$ V/1.0 kΩ = 4 mA; $I=4$ V/10 kΩ = 400 μA; $I=4$ V/100 kΩ = 40 μA; $I=4$ V/1.0 MΩ = 4 μA

实例相关练习

3.1 3.03 A
3.2 0.005 A
3.3 0.005 A
3.4 13.6 mA
3.5 21.3 μA
3.6 2.66 μA
3.7 37.0 mA
3.8 1.47 mA
3.9 1200 V
3.10 49.5 mV
3.11 0.150 mV
3.12 82.5 V
3.13 1755 V
3.14 2.20 Ω
3.15 68.2 kΩ
3.16 3.30 MΩ
3.17 是
3.18 0 V

自测题

1.(b) 2.(c) 3.(b) 4.(d) 5.(a) 6.(d) 7.(b) 8.(d)
9.(c) 10.(b)

故障检修测验

1.(a) 2.(b) 3.(a) 4.(c) 5.(a) 6.(b) 7.(b) 8.(c)
9.(b) 10.(c) 11.(b) 12.(a) 13.(c) 14.(b) 15.(c)

第4章　能量和功率

引言

从第3章中，读者已经学习了欧姆定律，了解到了电流、电压和电阻的相互关系。由电路中所存在的这三个量可以推导出第四个量——功率。我们将学到功率与电流、电压和电阻之间的关系。

能量是做功的能力，而功率是能量作用的速率。电流在电路中转移电能，当自由电子通过电路中的电阻时，由于在阻性材料中与原子发生碰撞导致其能量的损失，电子损失的电能就转化为热能。而电能作用的速率就是电路中的功率。

本章目标

- 清楚能量和功率的定义
- 计算电路中的功率
- 从功率的角度适当选择电阻
- 解释能量转换和压降
- 论述电源及其特性

主要术语

- 能量
- 功率
- 焦耳(J)
- 瓦特(W)
- 千瓦·小时
- 压降
- 安培·小时额定值
- 效率

技术实践

在本章的技术实践中读者可以了解到，本章所学习的理论同样适用了上一章所介绍的电阻箱中。假设在一个测试电路中，电阻箱所有电阻的最大电压为4伏。在这种情况下，需要评估每个电阻的额定功率。如果不够，需要用其他具有适当额定功率的电阻来代替。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

4.1　能量和功率

电流通过电阻时，电能转换为热能或其他形式的能量，例如光能。举一个很常见的例子，灯泡亮起来会越来越热就是这种情况。电流通过灯丝产生光能的同时也产生了不期望的热量，这是因为灯丝相当于电阻。功率是用来测量能量转换速率的量，在一定的时间周期内电元件一定会消耗大量的能量。

完成本节的学习后，读者应该能够：

- 定义能量和功率
- 用能量来描述功率
- 说明功率的单位
- 说明能量的常用单位
- 完成能量和功率的计算

能量是做功的能力。

功率是能量作用的速率。

功率(P)可以用下式来表示，式中 W 为在 t 时间段内所产生或消耗的能量。

$$P=\frac{W}{t} \tag{4.1}$$

能量的单位是焦耳(J)，时间的单位是秒(s)，功率的单位是瓦特(W)。斜体 W 代表能量，正体的 W 代表功率的单位——瓦特。

能量除以时间得到功率。例如，2 秒产生或消耗了 50 焦耳的能量，其功率为 50 J/2 s = 25 W。

定义：在一秒钟内产生或消耗 1 焦耳的能量，其功率为 1 瓦特。

因此，1 秒钟所产生或消耗的焦耳数就相当于瓦特数。例如，1 秒产生或消耗 75 J 的能量，则功率为 75 W。

在常用的电子领域，功率的值都小于 1 瓦特。当电流和电压都很小时，需要用国际单位词头来表示很小的功率。所以，在一些应用中会常常用到毫瓦(mW)、微瓦(μW)，甚至是皮瓦(pW)这样单位的量。

在电力系统中，千瓦(kW)和兆瓦(MW)都是常用的单位。而广播站和电视台也常常需要利用大功率来传输信号。

例 4.1　在 5 s 内产生或消耗了 100 J 的能量，求功率是多少瓦特？

解：

$$P=\frac{\text{能量}}{\text{时间}}=\frac{W}{t}=\frac{100\ \text{J}}{5\ \text{s}}=\mathbf{20\ W}$$

练习： 如果 30 s 内产生的功率为 100 W，则其产生或消耗的能量为多少焦耳？

例 4.2　用适当的国际单位词头表示下列功率的值。

(a) 0.045 W　(b) 0.000 012 W　(c) 3500 W　(d) 10 000 000 W

解： (a) 0.045 W = **45 mW**　(b) 0.000 012 W = **12 μW**

(c) 3500 W = **3.5 kW**　(d) 10 000 000 W = **10 MW**

练习： 不用国际单位词头，将下列功率的值转换成以瓦特为单位的数值。

(a) 1 mW　(b) 1800 μW　(c) 1000 mW　(d) 1 μW

4.1.1 能量的单位——千瓦·小时

如式(4.1)所示，功率代表能量产生或消耗的速率。一段时间内的功率等于消耗的能量。用功率乘以时间得到能量，符号为 W：

$$W=Pt \tag{4.2}$$

能量的单位为焦耳。然而,还有其他的方法可用来表示能量的单位。如果功率用瓦特表示,时间用秒表示时,能量的单位为瓦特·秒(Ws),而瓦特·小时(Wh)和千瓦·小时(kWh)也经常使用。当你交纳电费时,都是以能量而不是功率为计量基准的。这是因为电力公司所配给的能量值都很大,所以最实用的单位就是用千瓦·小时。当功率为1千瓦特时,在1小时内所消耗的能量就为1千瓦·小时。例如,一个100 W的灯泡持续照明10 h(小时),消耗的能量为1千瓦·小时。

$$W = Pt = (100\ \text{W})(10\ \text{h}) = 1000\ \text{Wh} = 1\ \text{kWh}$$

例4.3 将以下消耗的能量用千瓦·小时来表示。

(a) 1400 W 持续 1 h　　(b) 2500 W 持续 2 h　　(c) 100 000 W 持续 5 h

解:(a) 1400 W = 1.4 kW　　$W = Pt = (1.4\ \text{kW})(1\ \text{h}) = \mathbf{1.4\ kWh}$

(b) 2500 W = 2.5 kW　　$W = Pt = (2.5\ \text{kW})(2\ \text{h}) = \mathbf{5\ kWh}$

(c) 100 000 W = 100 kW　　$W = Pt = (100\ \text{kW})(5\ \text{h}) = \mathbf{500\ kWh}$

练习:一个250 W的灯泡持续照明8 h(小时)所消耗的能量为多少千瓦·小时?

4.1节练习

1. 定义功率
2. 用能量和时间写出功率的公式
3. 定义瓦特
4. 用最适当的单位表示下列功率的值:

   (a) 68 000 W　　(b) 0.005 W　　(c) 0.000 025 W
5. 功率为100 W,在10 h内产生或消耗的能量为多少kWh?
6. 用千瓦·小时表示2000 Wh
7. 用千瓦·小时表示360 000 Ws

4.2 电路中的功率

电路中有电流通过电阻时会产生热,是由电能转化为热能所产生的。然而,在某些情况下电路的主要目的是用于产生热,例如电阻加热器。无论在何种情况下,都应该考虑到电路和电子电路中的功率。

完成这一节的学习后,读者应该能够掌握:

- 如何计算电路中的功率。
- 已知 I 和 R 的数值,如何确定功率。
- 已知 V 和 I 的数值,如何确定功率。
- 已知 V 和 R 的数值,如何确定功率。

电阻中有电流通过时,电子的碰撞产生了热,这是电能转化的结果,如图4.1所示。一个电路中总是存在一定的功率损耗,这是由电阻的阻值以及流经电阻的电流决定的,表达式为:

$$P = I^2R \tag{4.3}$$

通过用 V 代替 IR,功率的表达式还可以用电压和电流的乘积(I^2 是 $I \times I$)来表示。

$$P = I^2R = (I \times I)R = I(IR) = (IR)I$$

$$P = VI \tag{4.4}$$

电压的单位为伏特,电流的单位为安培时,功率的单位为瓦特。通过用 V/R 替换 I(欧姆定律),可以得到功率的另一个表达式。

$$P = VI = \left(\frac{V}{R}\right)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \tag{4.5}$$

上述表达式的关联表示就是瓦特定律。其中,I 的单位必须为安培,V 的单位必须为伏特,R 的单位必须为欧姆。

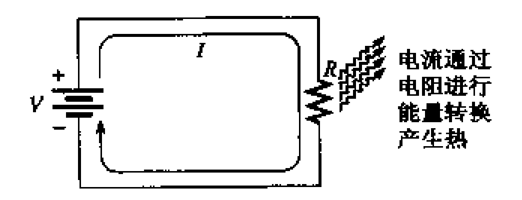


图 4.1　电阻消耗功率导致热能被释放

4.2.1　功率计算公式的恰当应用

计算电阻的功率,可以利用已知的信息选择上述三个公式中的一个来求解。例如,假设已知电流和电压,可以运用 $P = VI$ 这个公式来计算功率。如果已知 I 和 R,可以用 $P = I^2R$ 求解;如果已知 V 和 R,可以用 $P = V^2/R$ 求解。

例 4.4　计算图 4.2 中三个回路的功率。

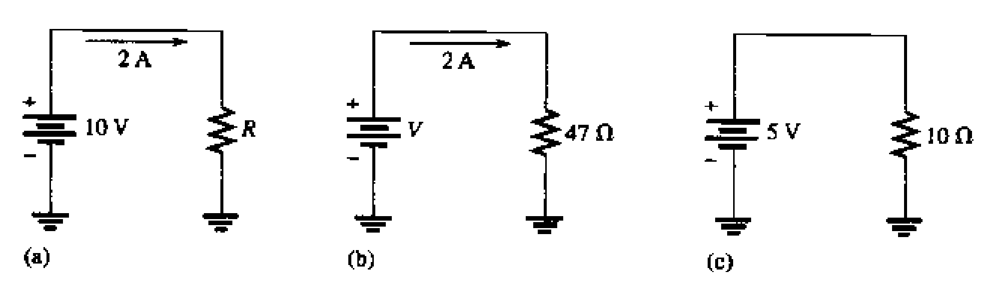


图 4.2

解:回路(a),已知 V 和 I,因此利用式(4.4):

$$P = VI = (10\ \text{V})(2\ \text{A}) = \mathbf{20\ W}$$

回路(b),已知 I 和 R,因此利用式(4.3):

$$P = I^2R = (2\ \text{A})^2(47\ \Omega) = \mathbf{188\ W}$$

回路(c),已知 V 和 R,因此利用式(4.5):

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(5\ \text{V})^2}{10\ \Omega} = \mathbf{2.5\ W}$$

练习:图 4.2 中的回路进行如下变化时,求其功率。

回路(a):I 加倍,V 不变

回路(b):R 加倍,I 不变

回路(c):V 减半,R 不变

例 4.5　一个 100 W 的灯泡在 120 V 的电压下,需要多少电流才能正常照明?

解:利用式 $P=VI$,首先将等式互换,使 I 换到等式的左边:

$$VI=P$$

等式两边同除以 V,

$$\frac{\cancel{V}I}{\cancel{V}}=\frac{P}{V}$$

左边的 V 消去之后,得到:

$$I=\frac{P}{V}$$

用 100 W 替代 P,120 V 替代 V 代入等式,即得:

$$I=\frac{P}{V}=\frac{100\ \text{W}}{120\ \text{V}}=0.833\ \text{A}=\mathbf{833\ mA}$$

练习:一个灯泡从 110 V 电源处获得 545 mA 的电流,所消耗的功率为多少?

4.2 节练习

1. 如果一个电阻两端的电压为 10 V,通过的电流为 3 A,求其消耗的功率为多少?
2. 求图 4.3 中的电源产生的功率是多少? 电阻产生的功率是多少? 二者是否相等? 为什么?
3. 如果有 5 A 的电流通过 56 Ω 的电阻,求其消耗的功率为多少?
4. 如果 4.7 kΩ 的电阻通过 20 mA 的电流,求其消耗的功率为多少?
5. 将 5 V 电压加在 10 Ω 的电阻上,求其消耗的功率是多少?
6. 求 8 V 电压加在 2.2 kΩ 的电阻上所消耗的功率为多少?
7. 一个 75 W 的灯泡获得 0.5 A 的电流,求其阻值为多少?

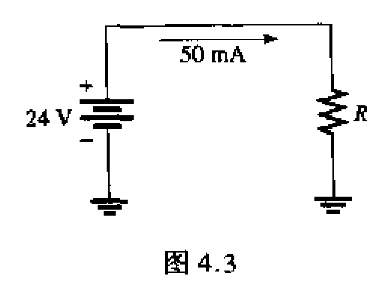


图 4.3

4.3 电阻的额定功率

我们已经知道电流通过电阻时会产生热,额定功率可以说明电阻散发的热量是多少。

完成这一节的学习后,读者应该能够:

- 从功率的角度出发适当地选择电阻
- 定义额定功率
- 解释如何根据电阻的额定功率确定电阻的物理特性
- 利用欧姆表检查电阻故障

额定功率是有热量集结而不使电阻损坏的最大功率。额定功率与电阻阻值无关,而是主要由其形状、大小以及物理成分决定的。其他条件相同时,电阻的表面积越大,所消耗的功率就越多。圆柱形电阻的表面积等于其长度(l)和圆周周长(c)的乘积,如图 4.4 所示,两端的面积不包含在内。

额定功率从$\frac{1}{8}$ W 到 1 W 的电阻可以采用金属膜电阻,如图 4.5 所示。其他类型的电阻也可以用到额定功率。例如,线绕电阻的额定功率一般在 225 W 或 225 W 以上。图 4.6 列出了一些这种类型的电阻。

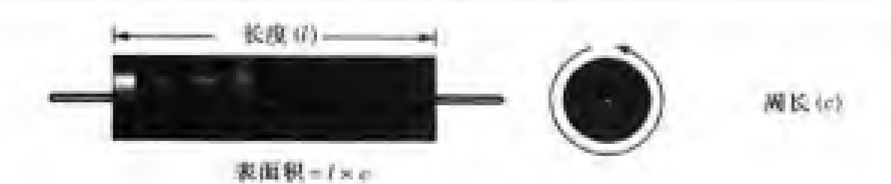


图 4.4　电阻的额定功率与其表面积有关

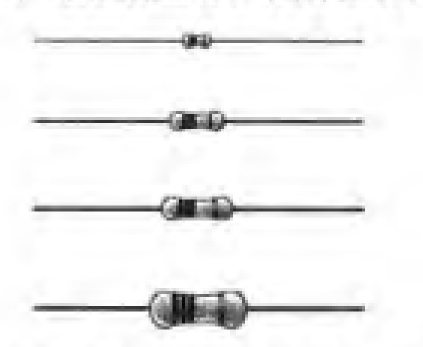


图 4.5　与额定功率为$\frac{1}{8}$ W、$\frac{1}{4}$ W、$\frac{1}{2}$ W 和 1 W 相对应的金属膜电阻相对大小



(a) 轴向引脚线绕电阻　(b) 可调线绕电阻　(c) 可插入电路板的径向引脚电阻

图 4.6　高额定功率的典型电阻实物图

安全提示：正常操作中电阻也可能会变得很热。为了避免烫伤，不要在电路连接着电源时接触电路元件。电源关闭后，要等元件冷却后再接触。

4.3.1　在实际应用中选择适当额定功率的电阻

将电阻应用到电路中时，电阻的额定功率必须大于所要消耗的最大功率。例如，如果一个电阻在电路中需要消耗 0.75 W 的功率，该电阻的额定功率最少应为 1 W。理想的电阻额定功率应该为其实际可能消耗功率的两倍。

例 4.6　根据图 4.7 的电路选择适当额定功率的金属膜电阻($\frac{1}{8}$ W、$\frac{1}{4}$ W、$\frac{1}{2}$ W 和 1 W)。

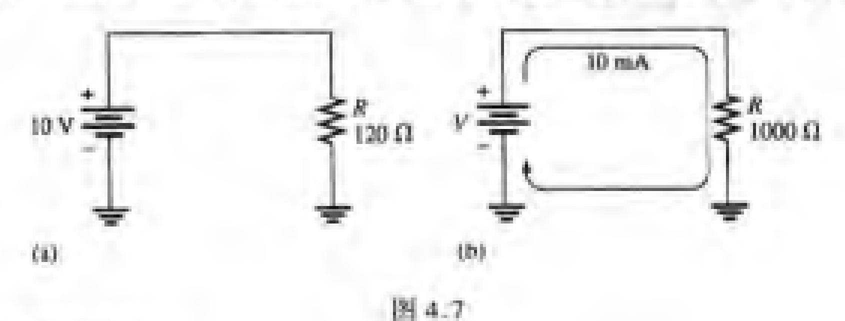


图 4.7

解：图 4.7(a)中，实际功率为：

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(100\ \text{V})^2}{120\ \Omega} = \frac{100\ \text{V}^2}{120\ \Omega} = 0.833\ \text{W}$$

选择一个高于实际功率的额定功率电阻。在本题中，可以选择额定功率为 1 W 的电阻。

图 4.7(b)中，实际功率为：

$$P = I^2R = (10\ \text{mA})^2(1000\ \Omega) = (10\times10^{-3}\ \text{A})^2(1000\ \Omega) = 0.1\ \text{W}$$

在本题中可以选择额定功率为$\frac{1}{8}$ **W(0.125 W)**的电阻。

练习：一个确定阻值的电阻消耗的功率为 0.25 W，其标准额定值应该为多少？

4.3.2 电阻故障

当电阻的功率大于额定值时，电阻将因此变得过热，导致电阻开路或阻值发生大幅度变化。

当电阻因为过热而损坏时，电阻表面会发生变化或烧焦，由此可以发现电阻已经损坏。如果从外表无法判断，可以用欧姆表检测怀疑受损的电阻，测量其是否开路或有不正确阻值。测量电阻阻值时需要将电阻从电路中断开，这可以通过除去电阻一端或两端的导线来实现。

4.3.3 用欧姆表检查电阻

典型的数字万用表和模拟万用表实物图分别如图 4.8(a)和图 4.8(b)所示。如果用图 4.8(a)中的数字表，可以利用旋转开关选择欧姆(Ω)挡。不需要选择量程，因为这里量程是自动选取的，并通过数字显示屏直接读出电阻值。模拟表中大的旋转开关称为量程开关，要注意模拟表中的电阻量程(OHMS)的设置。

图 4.8(b)中的模拟表每一个欧姆挡的量程代表与表头刻度盘中刻度相乘的数值。例如，当刻度盘指针指到欧姆刻度的 50 处，量程选择的是 ×10 挡，则被测量的电阻阻值为 50 × 10 Ω = 500 Ω。如果电阻是开路的，则无论量程选择多少，指针都置于刻度盘的最左侧(∞代表无限大)。



图 4.8 典型便携式万用表(图片使用经 B&K Precision Corp. 许可)

例 4.7 确定图 4.9 中哪个电路的电阻可能由于过热而损坏。

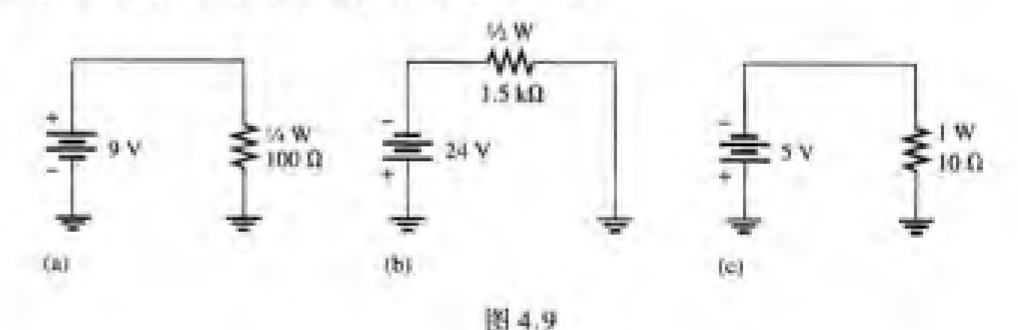


图 4.9

解:在图4.9(a)所示的电路中,

$$P=\frac{V^2}{R}=\frac{(9\ \text{V})^2}{100\ \Omega}=0.810\ \text{W}=810\ \text{mW}$$

电阻的额定功率为$\frac{1}{4}$ W(0.25 W),不够承受电源产生的功率。故此,电阻会出现过热的情况并有可能被烧坏而导致电路开路。

在图4.9(b)所示的电路中,

$$P=\frac{V^2}{R}=\frac{(24\ \text{V})^2}{1.5\ \text{k}\Omega}=0.384\ \text{W}=384\ \text{mW}$$

电阻的额定功率为$\frac{1}{2}$ W(0.5 W),足够承受电源产生的功率。

在图4.9(c)所示的电路中,

$$P=\frac{V^2}{R}=\frac{(5\ \text{V})^2}{10\ \Omega}=2.5\ \text{W}$$

电阻的额定功率为1 W,不够承受电源产生的功率。故此,电阻会出现过热的情况并有可能被烧坏而导致电路开路。

练习:一个额定功率为0.25 W,阻值为1.0 kΩ的电阻连接在一个12 V电池的两端,问其额定功率是否足够。

4.3节练习

1. 与电阻有关的两个重要参量是什么?
2. 电阻的物理尺寸如何决定其消耗的功率值的大小?
3. 列出金属膜电阻的标准额定功率。
4. 一个电阻必须消耗0.3 W的功率。如果使用金属膜电阻,求其额定功率最小是多少?

4.4 电阻的能量转换和压降

如上所述,电流通过电阻时电能转换为热能。这些热导致自由电子在阻性材料的原子结构中相互碰撞。碰撞发生时热量被释放,而电子为了在物质间移动必须消耗一些所获得的能量。

完成这一节的学习后,读者应该能够:

- 解释能量转换和压降
- 论述电路中能量转换的成因
- 定义压降
- 解释能量转换和压降间的相互关系

图4.10举例说明了电子从电源负极出发通过电路回到电源正极的过程。电子从电源负极出发时处于最高能级,然后电子通过相互连接的电阻(这种连接类型称为串联,将在第5章中介绍)组成的电流流通路径。电子每通过一个电阻,就有部分能量转换成热的形式被释放。因此,电子通过电阻之前的能量要高于通过之后的能量,图中通过颜色逐渐变浅来表示。当电子通过电路回到电池正极时处于最低能级。

回想一下,电压等于能量除以电荷总数($V=W/Q$),而电荷总数是由电子所携带的电荷数决定的。因此,基于电池的电压源,当电子从电源负极流出时为其提供大量能量。在电路中任意一点的电子数不变,而其能量在通过电阻时会减少。如图所示,当电子通过电阻R_1后所具有的能量比通过之前要少。

图 4.10 中,R_1 左端的电压等于 $W_{进入}/Q$,R_1 右端的电压等于 $W_{流出}/Q$。进入 R_1 前后的电子数相同,因此 Q 不变。然而能量 $W_{流出}$ 小于 $W_{进入}$,所以 R_1 右端的电压要少于其左端的电压,这就是电阻两端的压降。R_1 右端的负电压少于(正电压多于)R_1 左端,压降以"-"和"+"来说明("+"表示较低的负电压或较高的正电压)。

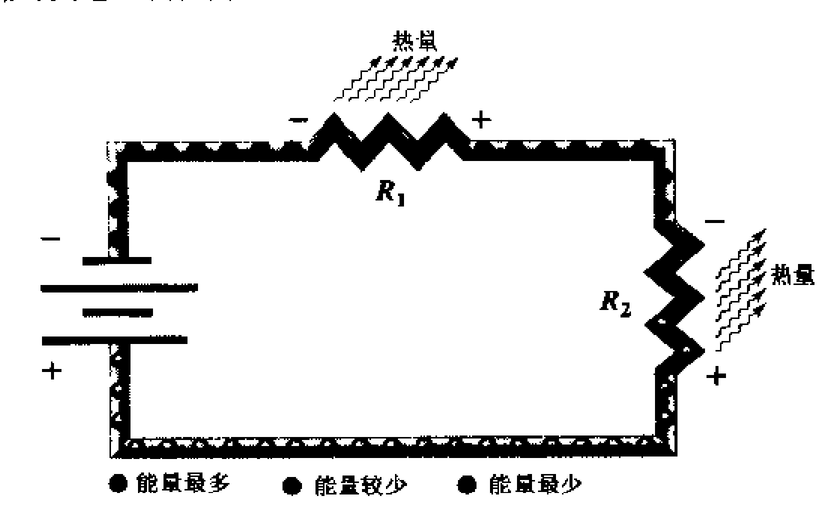


图 4.10 电压等于能量除以电荷总数,所以电子通过电阻时损失部分能量形成压降

电子在 R_1 处损失了一些能量,当其进入 R_2 时所带能量已经减少。而通过 R_2 后损失了更多的能量,其结果是在 R_2 处又形成另一个压降。

4.4 节练习

1. 在电阻处发生能量转换的基本原因是什么?
2. 什么是压降?
3. 压降的极性与传统电流方向的关系如何?

4.5 电源

通常来说,电源是一种为负载提供功率的设备。回想一下,负载就是与电源输出相连并从中获得电流的电路或电器件。

完成这一节学习后,读者应该能够:

- 论述电源及其特性
- 定义电池的安培·小时额定值
- 论述电源效率

图 4.11 中的方块代表一个电源,与一个负载相连,负载可以是从灯泡到计算机等的任意器件。如图所示,电源从两个输出端输出一个电压并产生电流通过负载。IV_{OUT} 是电源提供给负载并由负载消耗的功率。如果给定电源的输出电压(V_{OUT}),通过负载的电流越多意味着电源产生的功率越大。

电源种类很多,从简单的电池到稳压电子电源都是电源。稳压电子电源是一种能够产生精确输出电压并自动保持的设备。电池是一种直流电源,是通过将化学能转换为电能来实现的。电子电源通常是将墙上插座输出的 110 V/220 V 交流电转换为适合电子元件工作的稳定直流电压。

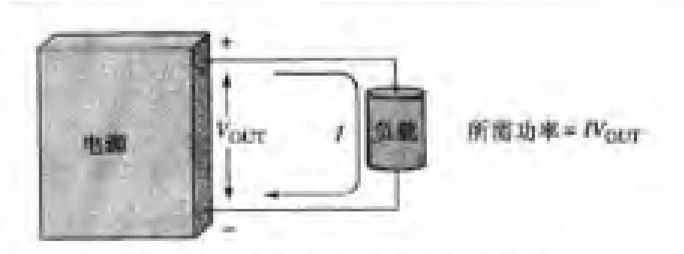


图4.11 电源和负载组成的结构图

4.5.1 电池的安培·小时额定值

电池是通过将化学能转换为电能工作的。由于其化学能资源有限，所以其容量必然有限。而这个容量限制了额定电压下提供电流的时间长短，这是可以测量的，可以用安培·小时作为其单位。安培·小时额定值决定了在额定电压下电池能够提供给负载定值电流的时间长度。

1安培·小时的额定值意味着一个电池在额定电压下能够持续1小时提供1安培的电流。相同的电池能够持续半小时提供2 A的电流。所以电池提供的电流越大，其寿命就越短。实际中，电池输出的电流和电压都是特定的。例如一个汽车电池的额定值为70 Ah(安培·小时)，输出电流为3.5 A，也就是在额定电压下可以持续20 h提供3.5 A的电流。

例4.8 一个额定值为70 Ah的电池，可以持续多少小时提供2 A的电流？

解：安培·小时额定值等于电流乘以持续的时间(x)：

$$70\text{ Ah} = (2\text{ A})(x\text{ h})$$

解得持续时间x为：

$$x = \frac{70\text{ Ah}}{2\text{ A}} = \mathbf{35\text{ h}}$$

练习：一个电池可以持续6 h提供10 A的电流，求其Ah额定值为多少？

4.5.2 电源效率

电子电源的一个重要特性是效率，效率就是输出功率与输入功率的比值。

$$效率 = \frac{P_{输出}}{P_{输入}} \tag{4.6}$$

效率常常用百分比来表示。例如，如果输入功率为100 W，而输出功率为50 W，则效率就是(50 W/100 W)×100% = 50%。

所有的电子电源都需要用动力供能。例如一个电子电源通常以其从墙上插座处获得的交流电作为输入，其输出通常是一个稳定的直流电压。输出功率总是小于输入功率，这是由于电源内部线路消耗了总功率中的一部分。这种内部电源消耗通常称为功率损耗，输出功率等于输入功率减去功率损耗。

$$P_{输出} = P_{输入} - P_{损耗} \tag{4.7}$$

效率越高意味着电源内部的损耗就越低，也就是在给定输入的情况下，输出功率所占的比例越大。

例4.9 一个电子电源的输入功率为25 W，能够产生20 W的输出功率，求其效率是多少？其功率损耗又是多少？

解：

$$效率 = \left(\frac{P_{输出}}{P_{输入}}\right)100\% = \left(\frac{20\text{ W}}{25\text{ W}}\right)100\% = \mathbf{80\%}$$

$$P_{损耗} = P_{输入} - P_{输出} = 25\ \text{W} - 20\ \text{W} = 5\ \text{W}$$

练习:一个电源的效率为92%,如果其输入功率为50 W,求其输出功率是多少?

4.5 节练习

1. 负载从电源处获得的电流增加时,这种变化表示负载变大还是变小?
2. 一个电源的输出电压为10 V,如果它提供给负载的电流为0.5 A,则负载消耗的功率为多少?
3. 如果电池的安培·小时额定值为100 Ah,求其可以持续多少小时向负载提供5 A的电流?
4. 如果将练习题3中的电池替换为一个输出电压为12 V的设备,在给负载提供5 A电流的情况下,求其功率为多少?
5. 一个电子电源用于实验室操作时的输入功率为1 W,输出功率为750 mW,求其效率是多少?功率损耗为多少?

技术实践

在本章的技术实践中,将第3章中改装的电阻箱放置在试验平台上。最后一次核对所有的电阻阻值。此外,必须确定每个电阻的额定功率是否足够。如果不够,需要置换为阻值足够的电阻。

额定功率

假设在第3章所改装的电阻箱中的每个电阻的额定功率为$\frac{1}{8}$ W,如图4.12所示。

- 如果每个电阻最大可以承受4 V的电压,确定电阻的额定功率是否足够。
- 如果额定功率不够,确定最小需要多大的额定功率,请从下述标准额定功率($\frac{1}{4}$ W,$\frac{1}{2}$ W,1 W,2 W和5 W)中选择。
- 为第3章示意图中的各个电阻加上额定功率值。


(a) 顶视图


(b) 底视图

图4.12

技术实践练习

1. 有多少电阻由于额定功率不够被替换?
2. 如果操作时电阻可以承受的最大电压为10 V,则需要替换哪些电阻,最小需要多大的额定功率?

小结

- 额定功率是安全使用情况下电阻所能承受的最大功率。
- 相对于物理尺寸较小的电阻来说,尺寸较大的电阻在电路中以热的形式消耗的功率较大。
- 电阻的额定功率必须大于其在电路中可能承受的最大功率。

- 额定功率与电阻阻值无关。
- 电阻过热或损坏时，通常为开路。
- 能量是做功的能力，等于功率乘以时间。
- 千瓦·小时是能量的单位。
- 当功率为 1 千瓦特时，在 1 小时内所消耗的能量就为 1 千瓦·小时。这也可以用其他瓦特和时间的组合来说明。
- 电源是一种用来操作电学和电子器件的能量源。
- 电池是一种将化学能转换为电能的电源。
- 电子电源是一种将商用能量（电力系统提供的交流电）转换为不同数值的稳定直流电压的仪器。
- 电源的输出功率是电源的输出电压与通过负载的电流的乘积。
- 负载是从电源中获得电流的器件。
- 电池的容量用安培·小时（Ah）来测量。
- 1 安培·小时等于持续 1 小时提供 1 安培的电流，这也可以用其他安培和时间的组合来说明。
- 相对于效率低的电路，效率高的电路功率损耗的百分比较小。

主要术语

安培·小时额定值：安培·小时额定值是由电池提供给负载的电流与其所持续时间长度的乘积决定的。

效率：电路中输出功率与输入功率的比值，用百分比来表示。

能量：做功的能力。

焦耳（J）：能量的单位。

千瓦·小时（kWh）：一种在电力系统中常用的能量单位。

功率：能量的使用率。

压降：通过电阻前后能级的降低。

瓦特（W）：功率的单位。在 1 秒内产生或消耗 1 焦耳的能量，功率为 1 瓦特。

公式

4.1	$P=\frac{W}{t}$	功率等于能量除以时间
4.2	$W=Pt$	能量等于功率乘以时间
4.3	$P=I^2R$	功率等于电流的平方乘以电阻
4.4	$P=VI$	功率等于电压乘以电流
4.5	$P=\frac{V^2}{R}$	功率等于电压的平方除以电阻
4.6	$\text{效率}=\frac{P_{输出}}{P_{输入}}$	电源效率
4.7	$P_{输出}=P_{输入}-P_{损耗}$	输出功率等于输入功率减去功率损耗

自测题

1. 功率可以定义为：：

   (a) 能量　(b) 热　(c) 能量的使用速率　(d) 使用能量所需的时间

2. 在 10 s 内消耗 200 J 的能量，功率为：

   (a) 2000 W　(b) 10 W　(c) 20 W　(d) 2 W

3. 如果在 300 ms 内使用了 10 000 J 的能量，功率为：

   (a) 33.3 kW　(b) 33.3 W　(c) 33.3 mW

4. 50 kW 等于：

(a) 500 W (b) 5000 W (c) 0.5 MW (d) 50 000 W

5. 0.045 W 等于：

(a) 45 kW (b) 45 mW (c) 4500 μW (d) 0.000 45 MW

6. 电压为 10 V，电流为 50 mA，功率为：

(a) 500 mW (b) 0.5 W (c) 500 000 μW (d) 答案(a)，(b)和(c)

7. 当通过 10 kΩ 电阻的电流为 10 mA 时，功率为：

(a) 1 W (b) 10 W (c) 100 mW (d) 1000 μW

8. 一个 2.2 kΩ 电阻消耗的功率为 0.5 W，电流为：

(a) 15.1 mA (b) 0.227 mA (c) 1.1 mA (d) 4.4 mA

9. 一个 330 Ω 电阻消耗的功率为 2 W，电压为：

(a) 2.57 V (b) 660 V (c) 6.6 V (d) 25.7 V

10. 功率为 500 W 时，在 24 小时内消耗的能量为：

(a) 0.5 kWh (b) 2400 kWh (c) 12 000 kWh (d) 12 kWh

11. 功率为 75 W 时，使用 10 h，用瓦特·小时来表示为：

(a) 75 Wh (b) 750 Wh (c) 0.75 Wh (d) 7500 Wh

12. 一个 100 Ω 的电阻所能通过的最大电流为 35 mA，则其额定功率至少为：

(a) 35 W (b) 35 mW (c) 123 mW (d) 3500 mW

13. 电阻的实际消耗功率需要在 1.1 W 之上，则其额定功率应该取：

(a) 0.25 W (b) 1 W (c) 2 W (d) 5 W

14. 一个额定功率为 0.5 W 的 22 Ω 电阻，与一个额定功率为 0.5 W 的 220 Ω 电阻，两端各自加上 10 V 电压，哪一个电阻将会过热损坏？

(a) 22 Ω (b) 220 Ω (c) 两者都损坏 (d) 两者都不损坏

15. 一个模拟欧姆表显示为无限大时，被测电阻处于：

(a) 过热状态 (d) 短路状态 (c) 开路状态 (d)翻转状态

16. 一个 12 V 的电池连接一个 600 Ω 的电阻。在这种情况下，如果电池的额定值为 50 Ah，则可以向负载提供多长时间的电流？

(a) 2500 h (b) 50 h (c) 25 h (d) 4.16 h

17. 一个电源可以持续 2.5 h 提供 8 A 的电流，其安培·小时额定值为：

(a) 2.5 Ah (b) 20 Ah (c) 8 Ah

18. 一个电源的输入功率为 0.6 W 时，输出功率为 0.5 W，其效率为：

(a) 50% (b) 60% (c) 83.3% (d) 45%

故障检修测验

1. 通过一个定值电阻的电流从 10 mA 增加到 12 mA 时，电阻的功率将：

(a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

2. 加在一个定值电阻两端的电压从 10 V 降到 7 V 时，电阻的功率将：

(a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

3. 如果一个可变电阻两端的电压为 5 V，当其电阻变小时，电阻的功率将：

(a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

4. 如果加在电阻两端的电压从 5 V 升到 10 V，且电流从 1 mA 增加到 2 mA，则功率将：

(a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

5. 如果连接电池的负载阻值增加，则电池可以提供电流的时间将：

(a) 增加 (b) 缩短 (c) 保持不变

6. 如果电池能够持续向负载提供电流的时间缩短，其安培·小时额定值将：

(a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

7. 如果电池需要提供给负载的电流增加，则电池的供电时间将：

(a) 延长 (b) 缩短 (c) 保持不变

8. 如果没有负载与电池相连接，则电池的安培·小时额定值将：

(a) 变大 (b) 减小 (c) 保持不变

参见图 4.11

9. 如果电源的输出电压上升，对于定值电阻来说功率将：

(a) 变大 (b) 变小 (c) 保持不变

10. 对于固定的输出电压，如果通过负载的电流下降，负载功率将：

(a) 变大 (b) 变小 (c) 保持不变

11. 对于固定的输出电压，如果负载的电阻阻值增加，负载功率将：

(a) 变大 (b) 变小 (c) 保持不变

12. 如果电路中的负载被移除形成开路，理想的电源输出电压将：

(a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变

习题(带星号的题目较难，奇数序号的题目答案在本书末尾处)

4.1 节 能量和功率

1. 当能量以 350 J/s 的速率消耗时，其功率是多少？
2. 在 5 h 内消耗 7500 J 的能量，功率为多少 W？
3. 在 50 ms 内消耗 1000 J 的能量，功率为多少 W？
4. 将下列数据单位转换为 kW：

(a) 1000 W (b) 3750 W (c) 160 W (d) 50 000 W

5. 将下列数据单位转换为 MW：

(a) 1 000 000 W (b) 3×10^6 W (c) 15×10^7 W (d) 8700 kW

6. 将下列数据单位转换为 mW：

(a) 1 W (b) 0.4 W (c) 0.002 W (d) 0.0125 W

7. 将下列数据单位转换为 μW：

(a) 2 W (b) 0.0005 W (c) 0.25 mW (d) 0.006 67 mW

8. 将下列数据单位转换为 W：

(a) 1.5 kW (b) 0.5 MW (c) 350 mW (d) 9000 μW

9. 一个电子设备的使用功率为 100 mW。如果持续运转 24 h，将消耗多少 kWh 的能量？

*10. 一台小型家电的使用功率为 300 W。如果允许其持续使用 30 天,将消耗多少 kWh 的能量?

*11. 月末你收到电力公司的账单时,账单上显示你一个月使用了 1500 kWh 的电,求每天使用的功率为多少?

12. 将 5×10^6 瓦特·分转换为千瓦·小时。

13. 将 6700 瓦特·秒转换为千瓦·小时。

14. 让 5 A 的电流通过 47 Ω 的电阻,求需要持续多少秒? 其消耗的能量为 25 J。

4.2 节 电路中的功率

15. 如果一个 75 V 的电源提供给负载的电流为 2 A,求负载的阻值为多少?

16. 如果加在电阻两端的电压为 5.5 V,通过的电流为 3 A,求其功率为多少?

17. 如果一个电暖气工作在 120 V 的电压下,通过的电流为 3 A,求其使用功率为多少?

18. 500 mA 的电流通过 4.7 kΩ 的电阻时,消耗的功率为多少?

19. 计算通过 100 μA 电流的 10 kΩ 电阻的功率为多少?

20. 如果将 60 V 电压加在 680 Ω 电阻的两端,求其功率为多少?

21. 如果将一个 56 Ω 的电阻连接在 1.5 V 电池的两端,求其消耗的功率为多少?

22. 如果 2 A 的电流通过一个电阻消耗的功率为 100 W,求该电阻的阻值为多少?(假设电压可以调节为任意值。)

23. 一个 12 V 的电源连接在一个 10 Ω 电阻的两端,

(a)求持续 2 分钟所消耗的能量是多少?

(b)如果在 1 分钟后将电阻移除,请问相对于电阻仍然保留在电路中的情况,其功率是变大、变小,还是在这 2 分钟内保持不变。

4.3 节 电阻的额定功率

24. 一个 6.8 kΩ 的电阻在电路中烧坏,必须重新更换一个相同阻值的电阻。如果通过电阻的电流为 10 mA,电阻的额定功率应该为多少?(假设所能选择的都是标准额定功率的电阻。)

25. 一类有确定额定功率电阻的额定功率可以是 3 W,5 W,8 W,12 W 或 20 W。如果所用电器需要一个电阻,所要承受的功率接近 8 W。应该选择哪种额定值电阻,为什么?

4.4 节 电阻的能量转换和压降

26. 在图 4.13 中的每个电路上,为通过电阻的压降标注正确的极性。

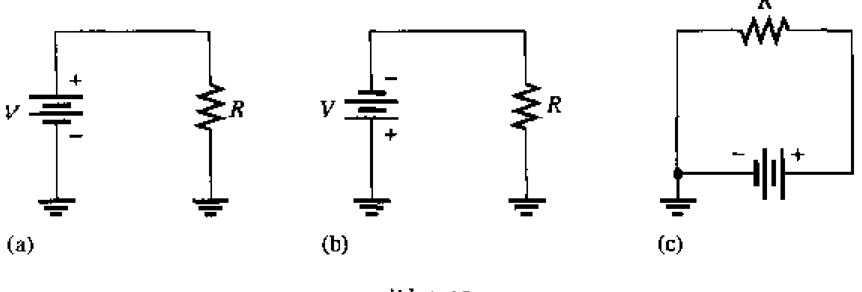


图 4.13

4.5 节 电源

27. 一个 50 Ω 电阻的使用功率为 1 W,则电源的输出电压为多少?

28. 一个电池可以持续 24 h 提供 1.5 A 的电流,求其 Ah 额定值?

29. 一个 80 Ah 的电池可以持续 10 h 提供多少电流?

30. 如果一个电池的额定值为 650 mAh,那么可以持续 48 h 提供多少电流?

31. 如果一个电源的输入功率为 500 mW,输出功率为 400 mW,则功率损耗为多少? 电源的效率又是多少?

32. 如果电源输入功率为 5 W,效率为 85%,其输出功率为多少?

*33. 一个电源持续提供 2 W 的功率给负载,而其效率为 60%。在 24 h 周期内,该电源所使用的能量为多少 kWh。

EWB/Multisim 故障检修

这些问题需要本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

34. 打开文件 P04-34 并确定电流、电压和电阻。应用测量值计算功率。
35. 打开文件 P04-35 并确定电流、电压和电阻。根据测量值计算功率。
36. 打开文件 P04-36,测量灯泡中的电流,根据灯泡的额定电压与额定功率计算出其额定电流,并确定所测的数值是否与计算的数值一致。

答案

4.1 节　能量和功率

1. 功率是能量的使用速率。
2. $P = W/t$
3. 功率的单位为瓦特,在 1 s 内产生或消耗 1 J 的能量,功率为 1 W。
4. (a)68 000 W = 68 kW　(b) 0.005 W = 5 mW　(c) 0.000 025 W = 25 μW
5. $W = (0.1\ \text{kW})(10\ \text{h}) = 1\ \text{kWh}$
6. 2000 Wh = 2 kWh
7. 360 000 Ws = 0.1 kWh

4.2 节　电路中的功率

1. $P = (10\ \text{V})(3\ \text{A}) = 30\ \text{W}$
2. $P = (24\ \text{V})(50\ \text{mA}) = 1.2\ \text{W}$;1.2 W;数值是相同的,这是由于通过电源产生的能量与通过电阻消耗的能量是相等的。
3. $P = (5\ \text{A})^2(56\ \Omega) = 1400\ \text{W}$
4. $P = (20\ \text{mA})^2(4.7\ \text{k}\Omega) = 1.88\ \text{W}$
5. $P = (5\ \text{V})2/10\ \Omega = 2.5\ \text{W}$
6. $P = (8\ \text{V})^2/2.2\ \text{k}\Omega = 29.1\ \text{mW}$
7. $R = 75\ \text{W}/(0.5\ \text{A})^2 = 300\ \Omega$

4.3 节　电阻的额定功率

1. 电阻的两个参量为阻值和额定功率。
2. 表面积较大的电阻消耗的功率较大。
3. 0.125 W,0.25 W,0.5 W,1 W
4. 实际需要消耗 0.3 W 功率的电阻需要的最小额定功率为 0.5 W。

4.4 节　电阻的能量转换和压降

1. 电阻的能量转换是由物质原子内的自由电子相互碰撞形成的。
2. 压降是两点间进行能量转换所形成的电压差。
3. 压降从负到正,与传统电流方向相反。

4.5 节　电源

1. 电流越大意味着负载越大。
2. $P = (10\ \text{V})(0.5\ \text{A}) = 5\ \text{W}$

3. $t = 100\ \text{Ah}/5\ \text{A} = 20\ \text{h}$
4. $P = (12\ \text{V})(5\ \text{A}) = 60\ \text{W}$
5. 效率 = (0.75 W/1 W)100% = 75%；$P_{损耗} = 1000\ \text{mW} - 750\ \text{mW} = 250\ \text{mW}$

技术实践

1. 两个
2. 10 Ω,10 W;100 Ω,1 W;400 Ω,$\frac{1}{4}$ W

实例相关练习

4.1 3000 J
4.2 (a) 0.001 W (b) 0.0018 W (c) 1 W (d) 0.000 001 W
4.3 2 kWh
4.4 (a) 40 W (b) 376 W (c) 625 mW
4.5 60 W
4.6 0.5 W
4.7 是
4.8 60 Ah
4.9 46 W

自测题

1.(c) 2.(c) 3.(a) 4.(d) 5.(b) 6.(d) 7.(a) 8.(a) 9.(d)
10.(d) 11.(b) 12.(c) 13.(c) 14.(a) 15.(c) 16.(a) 17.(b) 18.(c)

故障检修测验

1.(a) 2.(b) 3.(a) 4.(a) 15.(b) 6.(c)
7.(b) 8.(c) 9.(a) 10.(b) 11.(b) 12.(c)

第5章　串联电路

引言

第3章和第4章分别介绍了欧姆定律和电阻的功率。在这一章里，读者将学会如何把这些概念应用于电阻串联的电路里。

电阻电路由两种基本的类型组成：串联和并联。本章介绍的是串联电路。并联电路和串并联混合电路将分别在第6章和第7章中介绍。本章将介绍欧姆定律在串联电路中的应用，而且还要讲到另外一个重要的电路定律——基尔霍夫电压定律。最后还将介绍串联电路的应用，例如分压器。

电阻串联在一起，并且给这个串联电路加上电压时，电路只有一条电流通路。因此，串联电路中的每一个电阻上通过的电流是一样的。电路里所有电阻的和构成了电路的总电阻，分布在各个电阻上的电压总和等于加在整个电路上的电压。

本章目标

- 识别串联电路
- 确定串联电路中的电流
- 确定串联电路的总电阻
- 串联电路中欧姆定律的应用
- 确定电压源串联的总效应
- 基尔霍夫电压定律的应用
- 将串联电路作为分压器
- 确定串联电路中的功率
- 确定并识别电路中的接地处
- 串联电路的故障检修

主要术语

- 串联
- 基尔霍夫电压定律
- 分压器
- 电路接地
- 开路
- 短路

技术实践

在技术实践中，我们将测评一个连接到12 V电池上的分压器的电路板。它可以通过一种电子仪器提供可选或固定的参考电压。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

5.1　串联电阻

在串联电路中，电阻排成一串，只有一条电流通路。

学完本节后读者应该能够：

- 识别串联电路
- 根据物理排列的电阻画出电路图

图5.1(a)所示的是 AB 两端之间两个电阻串联连接，图5.1(b)中是三个电阻串联，而图5.1(c)中则是四个电阻串联。当然，串联电路中电阻的个数是随意的。

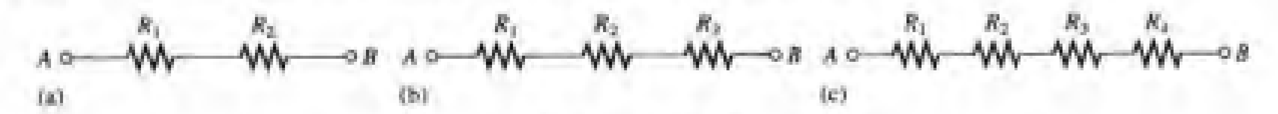


图5.1 串联电阻

如图5.1所示，任意一个连接中，电子从 A 端到 B 端的惟一路径是通过每个电阻。以下是识别串联电路的一个重要方法：

串联电路的两点之间只有一条电流通路，所以通过每个电阻的电流是一样的。

5.1.1 串联电路的识别

在实际的电路图中，串联电路可能不会像图5.1那样可以简单地直观识别。例如图5.2所示为串联电阻的其他画法。记住，无论图中的电阻如何分布，只要两点之间只有一个电流通路，那么两点之间的电阻就是串联的。

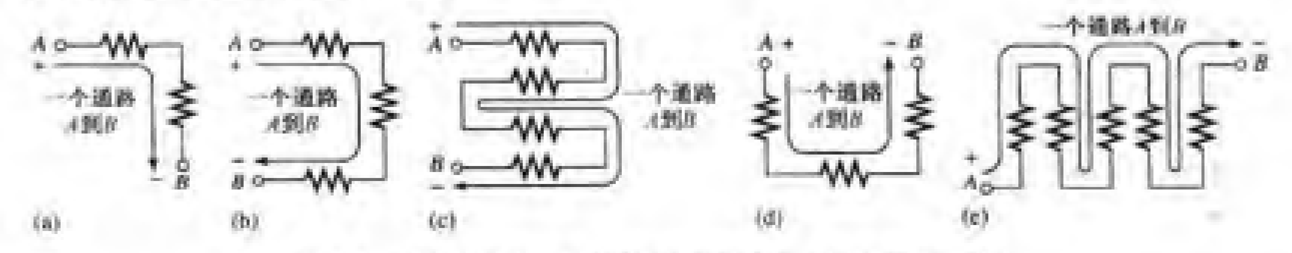


图5.2 串联电路的一些例子(注意所有点上的电流都一样)

例5.1 假设电路板上有五个电阻，分布如图5.3所示。若把它们串联起来，使得从正极开始，R_1 排在第一，R_2 在第二，R_3 排在第三，依次类推。画出这个连接的示意图。

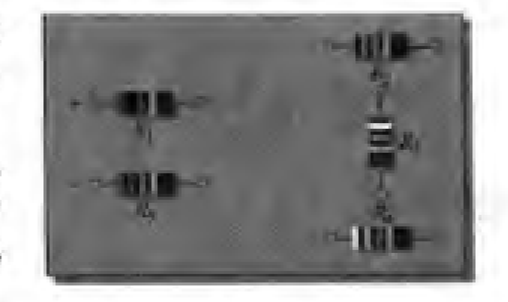


图5.3

解：图5.4(a)所示为实物连线图，图5.4(b)所示为原理图。需要注意的是，原理图中的电阻排列不需要像实物连线图中的一样。原理图描述的是在电路上元件如何连接，实物连线图描述的是在物理上元件如何排列以及相互连接。

练习：(a)将图5.4(a)所示的电路板重新连接，使得所有标号为奇数的电阻排在前面，标号为偶数的电阻排在后面。(b)确定每个电阻的阻值。

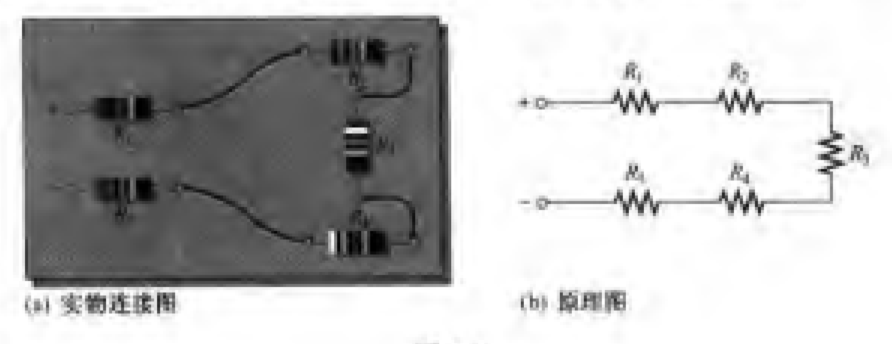


图5.4

例5.2 根据图5.5，描述印刷电路(PC)板上的电阻是如何连接的，并确定每个电阻的阻值。

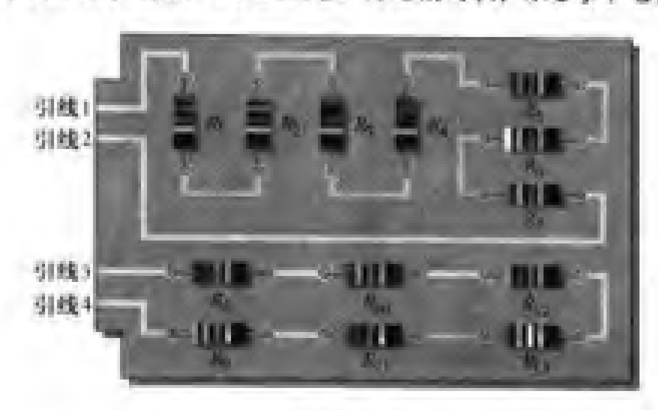


图5.5

解： 电阻 R_1 到 R_7 是相互串联的，这个串联组合是连接在PC板的引线1和引线2之间的。

电阻 R_8 到 R_{13} 是相互串联的，这个串联组合是连接在PC板的引线3和引线4之间的。

各电阻的阻值如下：$R_1=2.2\ \text{k}\Omega$，$R_2=3.3\ \text{k}\Omega$，$R_3=1.0\ \text{k}\Omega$，$R_4=1.2\ \text{k}\Omega$，$R_5=3.3\ \text{k}\Omega$，$R_6=4.7\ \text{k}\Omega$，$R_7=5.6\ \text{k}\Omega$，$R_8=12\ \text{k}\Omega$，$R_9=68\ \text{k}\Omega$，$R_{10}=27\ \text{k}\Omega$，$R_{11}=12\ \text{k}\Omega$，$R_{12}=82\ \text{k}\Omega$，$R_{13}=270\ \text{k}\Omega$。

练习： 如图5.5所示，若引线2和引线3连接，电路将有什么变化？

5.1节练习

1. 电阻如何连接成串联电路？
2. 如何识别串联电路？
3. 如图5.6所示，将各组电阻按照标号的顺序从 A 端到 B 端连成串联电路。
4. 如图5.6所示，将各组电阻相互连接成串联电路。

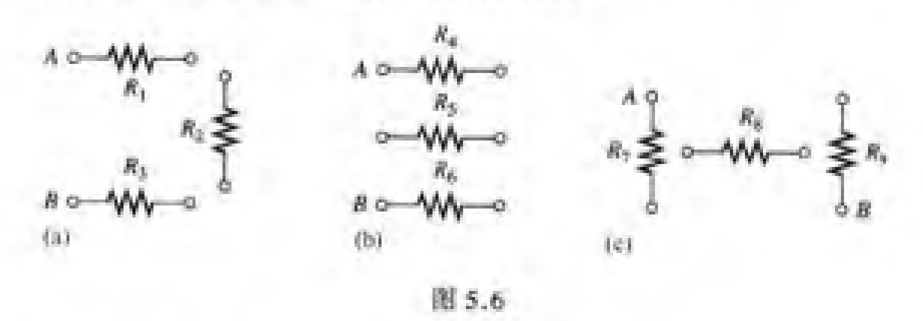


图5.6

5.2 串联电路中的电流

在串联电路中，通过每个节点的电流是一样的。通过每个电阻的电流和通过电路中其他电阻的电流是一样的。

学完本节后读者应该能够：

- 确定串联电路中的电流
- 了解串联电路中所有节点上的电流是一样的

如图5.7所示，三个电阻和一个直流电压源串联在一起。在这个电路的任何一个节点上，流入的电流必须和流出的电流相等，电流方向的箭头如图所示。同时要注意，流出每个电阻的电

流必须等于流入每个电阻的电流,因为电流没有其他支路并且没有流到其他地方。因此,电路中任何一部分的电流都等于其他部分的电流,从电源的正极到负极只有一条通路。

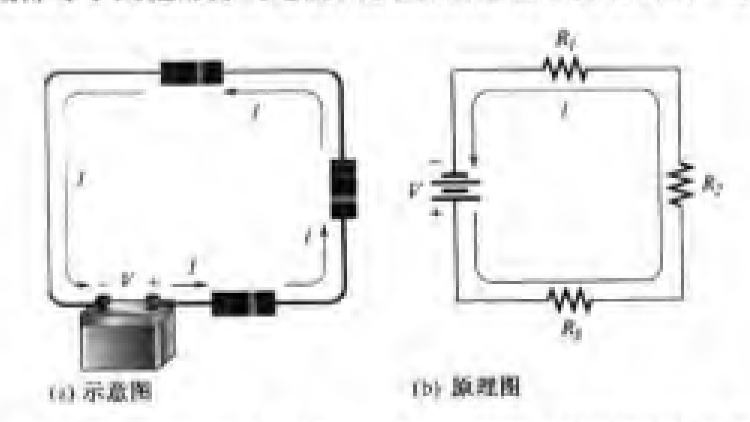


图 5.7 串联电路中,任意一点中流入的电流等于流出的电流

假设图 5.7 所示的电池给串联的电阻提供 1 安培的电流,则从电源的正极有 1 安培的电流流出。如果安培表接在电路的各个节点,如图 5.8 所示,则每个电表的读数都是 1 安培。

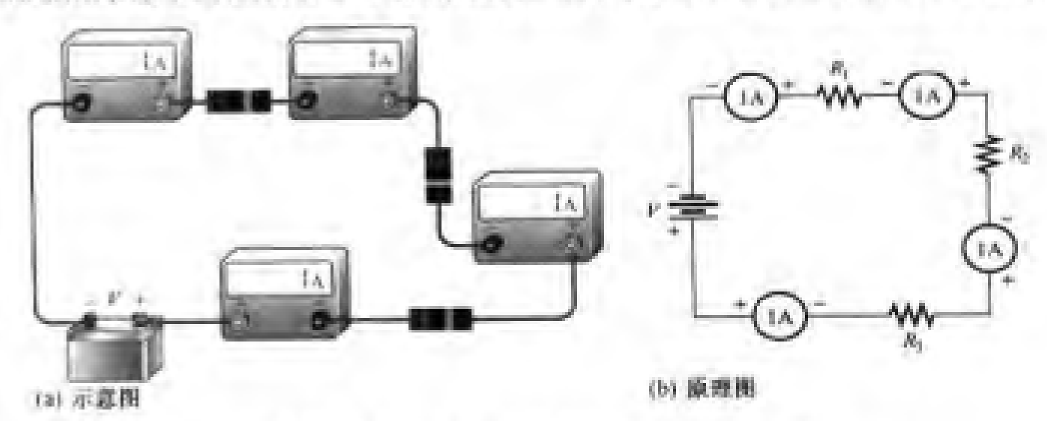


图 5.8 串联电路中,所有点上的电流都是一样的

5.2 节练习

1. 已知电路中一个 10 Ω 和一个 4.7 Ω 的电阻串联,若通过 10 Ω 电阻的电流是 1 A,那么通过 4.7 Ω 电阻的电流是多少?
2. 如图 5.9 所示,*AB* 两点之间连接一块毫安表,测量值是 50 mA。如果把毫安表连接在 *CD* 两点之间,那么毫安表指示的电流是多少?连接在 *EF* 两点之间呢?
3. 如图 5.10 所示,通过安培表 1 的电流是多少?通过安培表 2 的电流呢?
4. 对于串联电路中的电流量,谈谈你自己的看法。

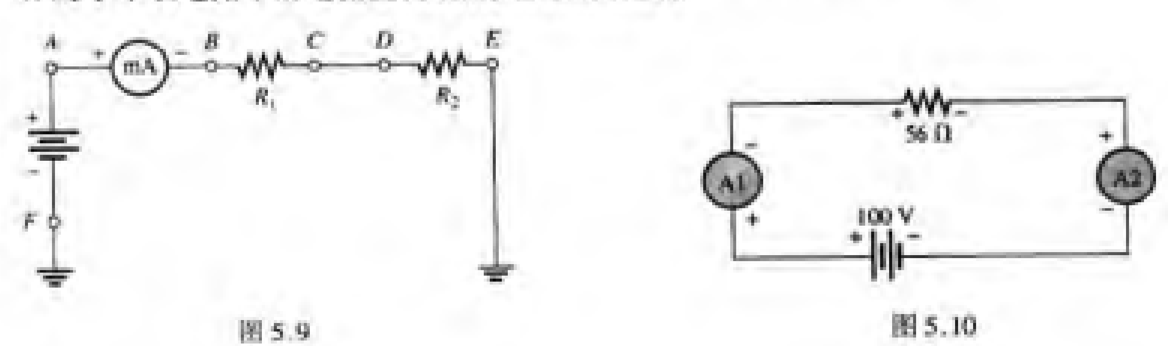


图 5.9

图 5.10

5.3 串联电路的总电阻

串联电路的总电阻等于电路中各个串联电阻阻值的总和。

学完本节后读者应该能够：

- 确定串联电路的总电阻
- 解释在电阻串联连接时为什么要将电阻值相加
- 应用串联电阻公式

5.3.1 串联电阻的阻值相加

当电阻串联时，电阻值相加是因为每个电阻直接按其电阻值的比例对电流提供阻碍。越多的电阻串联在一起就对电流造成越大的阻碍，电流受的阻碍越大意味着电阻越大。因此，每当串联电路中添加一个电阻时，总电阻就会增大。

图5.11说明添加串联电阻时总电阻是如何增加的。图5.11(a)中只有一个10 Ω的电阻，图5.11(b)中是另一个10 Ω的电阻和第一个电阻串联，得到的总电阻为20 Ω。如果再有一个10 Ω的电阻和前面两个电阻串联，如图5.11(c)所示，那么总电阻变为30 Ω。

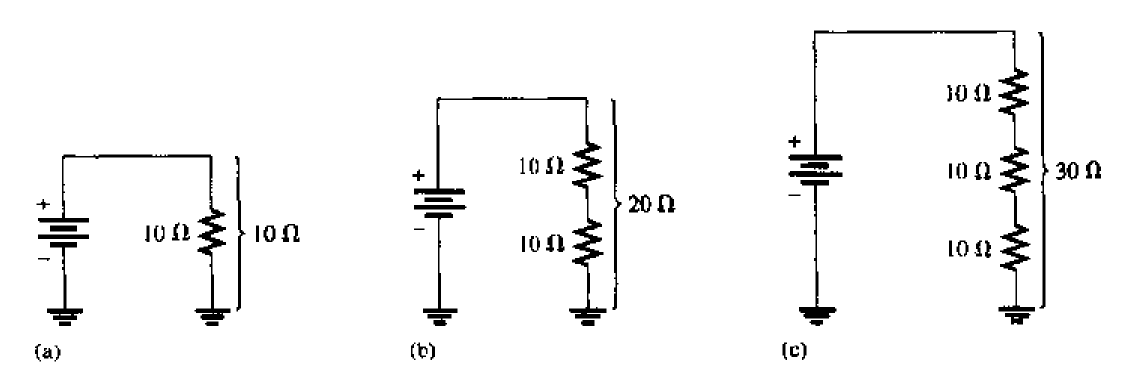


图5.11 随着串联电阻的增加总电阻会增大

5.3.2 串联电阻公式

任意单个电阻串联在一起，总电阻等于各个单电阻阻值的总和。

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \tag{5.1}$$

其中，R_T是总电阻，R_n是串联电路中的最后一个电阻（n可以是等于串联电路中电阻数的任意正整数）。例如，若电路中有4个电阻（$n=4$）串联，那么总电阻的公式为：

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

如果有6个电阻（$n=6$）串联，那么总电阻的公式为：

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$$

为了说明串联总电阻的计算，我们定义了电路的R_T，如图5.12所示。其中V_S是电压源，电路中有5个电阻串联。总电阻可以由数值简单地相加求得，如下：

$$R_T = 56\ \Omega + 100\ \Omega + 27\ \Omega + 10\ \Omega + 47\ \Omega = 240\ \Omega$$

要注意的是，图5.12所示的各电阻相加顺序的变化是没有影响的。改变电路中各电阻的物理位置，对电路及其总电阻也没有影响。

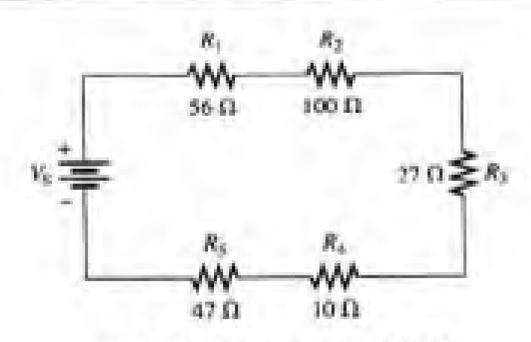
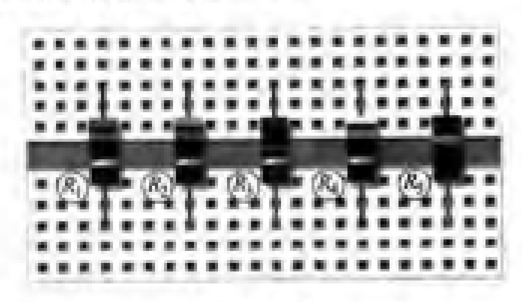


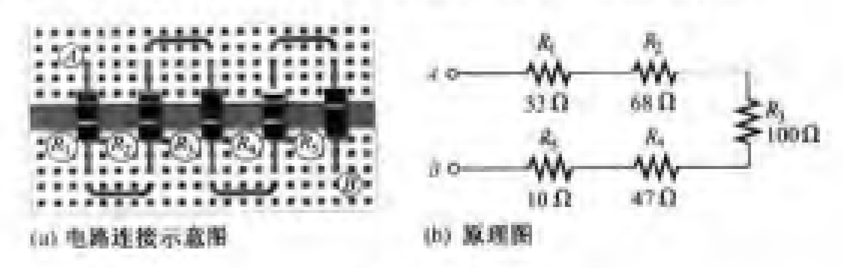
图 5.12 5个电阻串联的例子

例 5.3 将图 5.13 中的电阻串联起来,并求出总电阻 R_T。


图 5.13

解:电阻的连接如图 5.14 所示。将所有的电阻相加,求得总电阻。

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 33\ \Omega + 68\ \Omega + 100\ \Omega + 47\ \Omega + 10\ \Omega = \mathbf{258\ \Omega}$$



(a) 电路连接示意图 (b) 原理图

图 5.14

练习:如图 5.14(a)所示,如果把电阻 R_3 和 R_4 的位置互换,求总电阻。

例 5.4 如图 5.15 所示,求电路的总电阻(R_T)是多少?

解:将所有电阻相加。

$$R_T = 39\ \Omega + 100\ \Omega + 47\ \Omega + 100\ \Omega + 180\ \Omega + 68\ \Omega = \mathbf{534\ \Omega}$$

练习:以下电阻串联的总电阻是多少?

1.0 kΩ,2.2 kΩ,3.3 kΩ 和 5.6 kΩ

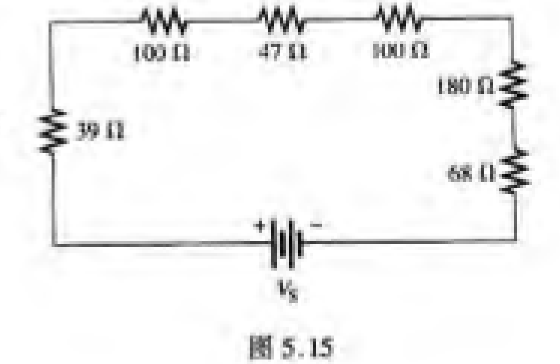


图 5.15

例 5.5 如图 5.16 所示,求电路中 R_4 的电阻值是多少?

解:由欧姆表的读数可知,$R_T = 17.9\ k\Omega$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

可以求得 R_4:

$$R_4 = R_T - (R_1 + R_2 + R_3) = 17.9\ k\Omega - (1.0\ k\Omega + 2.2\ k\Omega + 4.7\ k\Omega) = \mathbf{10\ k\Omega}$$

练习:若图 5.16 所示欧姆表的读数是 14.7 kΩ,求 R_4 的电阻值是多少?

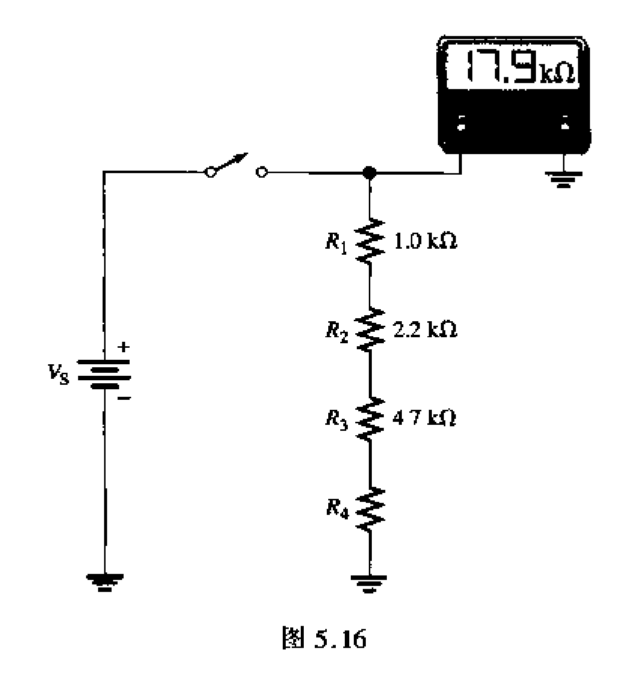


图 5.16

5.3.3 等阻值电阻的串联

如果一个电路中有多个等阻值的电阻串联，有一种快捷的方法可以得到总电阻：把电阻值和串联电路中的等阻值电阻个数简单地相乘。这种方法本质上和电阻值相加是一样的。例如，5 个 100 Ω 的电阻串联，那么 R_T 为 5(100 Ω) = 500 Ω。用公式可以表示为：

$$R_T = nR \tag{5.2}$$

其中，n 为等阻值电阻的个数，R 为电阻值。

例 5.6 8 个 22 Ω 的电阻串联，求总电阻 R_T 是多少？

解：通过电阻值相加求 R_T：

$$R_1 = 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega = \mathbf{176\ \Omega}$$

然而，获得同样的结果用相乘的方法会更简单：

$$R_T = 8(22\ \Omega) = \mathbf{176\ \Omega}$$

练习：3 个 1.0 kΩ 的电阻和两个 720 Ω 的电阻串联，求总电阻 R_T 是多少？

5.3 节练习

1. 下列电阻(每种分别只有一个)串联：1.0 Ω，2.2 Ω，3.3 Ω 和 4.7 Ω，求总电阻是多少？
2. 下列电阻串联：1 个 100 Ω，2 个 56 Ω，4 个 12 Ω 和 1 个 330 Ω，求总电阻是多少？
3. 假设以下电阻各有一个：1.0 kΩ，2.7 kΩ，5.6 kΩ 和 560 Ω。要获得阻值是 13.8 kΩ 的总电阻，需要另外一个电阻，这个电阻的阻值是多少？
4. 12 个 56 Ω 的电阻串联，求总电阻 R_T 是多少？
5. 20 个 5.6 kΩ 的电阻和 30 个 8.2 kΩ 的电阻串联，求总电阻 R_T 是多少？

5.4 串联电路中的欧姆定律

我们将通过一些例子来介绍欧姆定律和串联电路基本概念的应用。

学完本节后读者应该能够：

- 学握串联电路中欧姆定律的应用
- 求串联电路的电流
- 求串联电路中各电阻的电压

在分析串联电路时,需要注意以下几个要点:

1. 通过串联电路中任何一个电阻的电流和通过其他电阻的电流是一样的,而这个电流就是总电流。
2. 如果已知总电压和总电阻,可以由下面的公式求得总电流:

$$I_T = \frac{V_T}{R_T}$$

3. 如果已知串联电路中一个电阻上的电压降,可以由下面的公式求得电流:

$$I = \frac{V_R}{R}$$

4. 如果已知电路的总电流,那么串联电路中任何一个电阻上的电压降可以由以下公式求得:

$$V_R = I_T R$$

5. 电阻上电压降的极性确定方法是,电阻离电压源的正极最近的那一端是正的。
6. 通过电阻的电流方向是从电阻的正极指向负极。
7. 开路的串联电路阻止电流的通过。因此,每个电阻上的电压降都是0,总电压加在了开路的两点之间。

下面举几个欧姆定律应用的例子。

例5.7 如图5.17所示,求电路中的电流是多少?

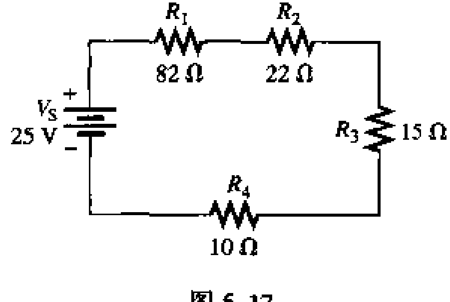


图 5.17

解:电流是由电压和总电阻决定的。首先计算总电阻:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 82\ \Omega + 22\ \Omega + 15\ \Omega + 10\ \Omega = 129\ \Omega$$

然后,用欧姆定律计算电流:

$$I = \frac{V_S}{R_T} = \frac{25\ \text{V}}{129\ \Omega} = 0.194\ \text{A} = \mathbf{194\ mA}$$

注意,电路中所有节点上的电流是一样的。因此,每个电阻上都有194 mA的电流通过。

练习:如图5.17所示,如果 R_4 的阻值变为100 Ω,求电流是多少?

例5.8 如图5.18所示,电路中的电流为1 mA。在电流处于该值时,电压源的电压 V_S 是多少?

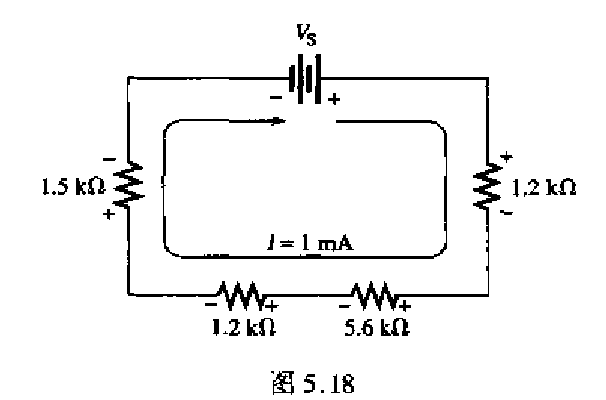


图 5.18

解:为了计算 V_S,先求 R_T:

$$R_T = 1.2\ \text{k}\Omega + 5.6\ \text{k}\Omega + 1.2\ \text{k}\Omega + 1.5\ \text{k}\Omega = 9.5\ \text{k}\Omega$$

接下来用欧姆定律求得 V_S:

$$V_S = IR_T = (1\ \text{mA})(9.5\ \text{k}\Omega) = \mathbf{9.5\ V}$$

练习:如果电路中的电流不变,把5.6 kΩ的电阻换成3.9 kΩ,计算 V_S 是多少?

例 5.9　如图 5.19 所示，求每个电阻上的电压和 V_S 是多少？在 5 mA 的保险丝烧断之前，V_S 能达到的最大值是多少？

解：根据欧姆定律，每个电阻上的电压等于它的电阻乘以通过它的电流。利用欧姆定律的公式 $V = IR$ 确定每个电阻上的电压。需要注意的是，通过每个电阻的电流是一样的。可将保险丝看成一根导线，其电阻可以忽略不计。R_1 上的电压（记做 V_1）为：

$$V_1 = IR_1 = (1\ \text{mA})(1.0\ \text{k}\Omega) = \mathbf{1\ V}$$

R_2 上的电压为：

$$V_2 = IR_2 = (1\ \text{mA})(3.3\ \text{k}\Omega) = \mathbf{3.3\ V}$$

R_3 上的电压为：

$$V_3 = IR_3 = (1\ \text{mA})(4.7\ \text{k}\Omega) = \mathbf{4.7\ V}$$

为求 V_S 的值，首先确定 R_T：

$$R_T = 1.0\ \text{k}\Omega + 3.3\ \text{k}\Omega + 4.7\ \text{k}\Omega = 9\ \text{k}\Omega$$

电压源的电压 V_S 等于电流乘以总电阻：

$$V_S = IR_T = (1\ \text{mA})(9\ \text{k}\Omega) = \mathbf{9\ V}$$

5 mA 保险丝　$I = 1$ mA　V_S　R_1 1.0 kΩ　R_2 3.3 kΩ　R_3 4.7 kΩ

图 5.19

注意，如果把分布在各电阻上的电压降相加，得到的和为 9 V，与电压源是一样的。

保险丝的额定电流为 5 mA；因此，V_S 可以增加到 $I = 5$ mA 时的电压值。V_S 的最大值计算如下：

$$V_{S(max)} = IR_T = (5\ \text{mA})(9\ \text{k}\Omega) = \mathbf{45\ V}$$

练习：如果 $R_3 = 2.2\ \text{k}\Omega$，电流 I 仍为 1 mA，重新计算 V_1，V_2，V_3，V_S 和 $V_{S(max)}$。

例 5.10　有些电阻没有用色环编码，但是电阻值已经印在电阻上了。图 5.20 所示的电路板已经安装好，电阻的标签朝下放置，而且没有其他文件标明电阻值。不能从电路板上移动电阻，试用欧姆定律确定各电阻的值。假设可用到一个万用表和一个电源，但万用表的欧姆挡功能不能使用。



图 5.20

解：所有的电阻都是串联的，所以通过每个电阻的电流都是一样的。如图 5.21 所示，通过连接一个 12 V（任意值）的电源和一个电流表来测量电流。将伏特表放置在第一个电阻两端来测量电压，然后用同样的测量方法测量其他三个电阻上的电压。假设电路板上指示的电压值就是被测量的值。

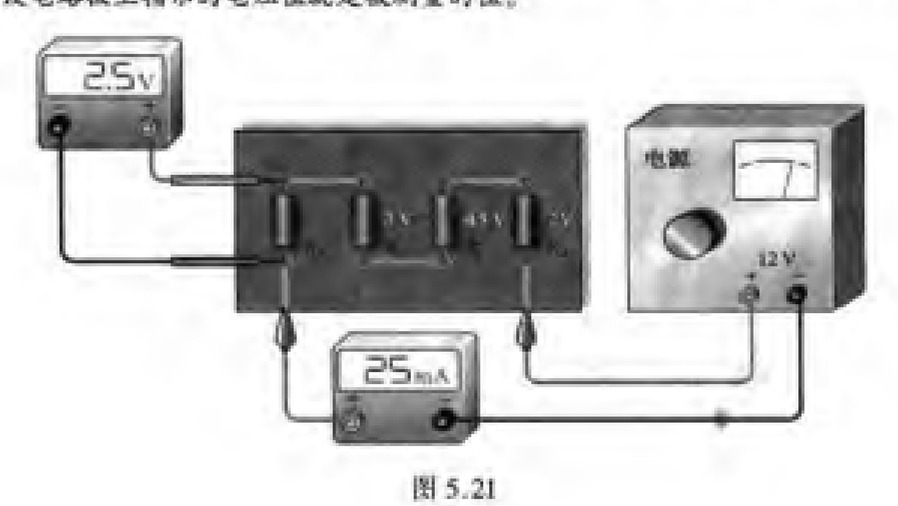


图 5.21

观察分布在每个电阻上的电压读数,将测得的电流和电压代入欧姆定律公式,来确定每个电阻的电阻值:

$$R_1 = \frac{V_1}{I} = \frac{2.5\ \text{V}}{25\ \text{mA}} = \mathbf{100\ \Omega}$$

$$R_2 = \frac{V_2}{I} = \frac{3\ \text{V}}{25\ \text{mA}} = \mathbf{120\ \Omega}$$

$$R_3 = \frac{V_3}{I} = \frac{4.5\ \text{V}}{25\ \text{mA}} = \mathbf{180\ \Omega}$$

$$R_4 = \frac{V_4}{I} = \frac{2\ \text{V}}{25\ \text{mA}} = \mathbf{80\ \Omega}$$

注意,分布在阻值最大的电阻上的电压降也是最大的。

练习:什么方法可以比较容易地确定电阻值?

5.4 节练习

1. 已知一个 10 V 的电池和三个 100 Ω 的电阻串联,求通过每个电阻的电流有多大?
2. 如图 5.22 所示的电路中,需要多大的电压才能提供 5 A 的电流?
3. 如图 5.22 所示的电路中,当电流为 5 A 时,每个电阻上分布的电压降是多少?
4. 四个等阻值的电阻和一个 5 V 的电压源串联,测得电路中的电流为 4.63 mA,则每个电阻的阻值是多少?

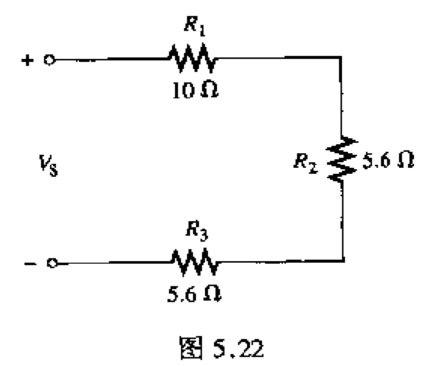


图 5.22

5.5 串联的电压源

电压源是一个给负载提供恒定电压的能量源。电池组和电子的电源是直流电压源的实例。学完本节后读者应该能够:

- 确定电压源串联的总效应
- 确定按相同极性串联的电压源的总电压
- 确定按相反极性串联的电压源的总电压

当两个或更多的电压源串联时,总电压等于各个电压源电压的代数和。代数和意味着当电压源串联的时候,要将电压源的极性也考虑在内。反向极性电压源的电压有反向的符号。

$$V_{S(tot)} = V_{S1} + V_{S2} + \cdots + V_{Sn}$$

如果所有电压源的极性都是同一方向,如图 5.23(a)所示,则相加时所有的电压符号是一样的。从 A 端到 B 端的总电压为 4.5 V,A 端的极性高于 B 端。

$$V_{AB} = 1.5\ \text{V} + 1.5\ \text{V} + 1.5\ \text{V} = +4.5\ \text{V}$$

电压有双下标 AB,表示这个电压是 A 端相对于 B 端的。

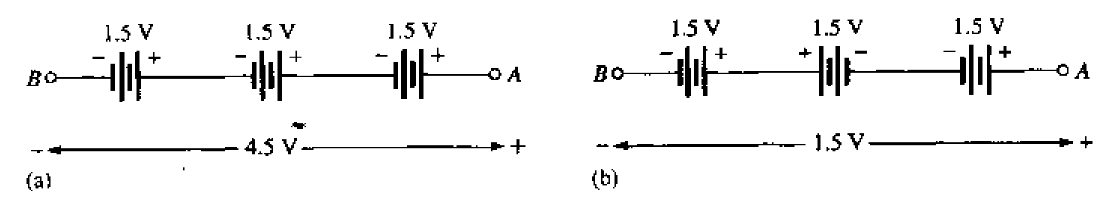


图 5.23 串联电压源的总电压为各电源电压相加的代数和

在图 5.23(b)中，中间的电压源方向和其他两个电压源方向是相反的。所以和其他电压相加时，它的电压带一个反向的符号。在这种情况下，从 A 到 B 的总电压为：

$$V_{AB} = +1.5\ \text{V} - 1.5\ \text{V} + 1.5\ \text{V} = +1.5\ \text{V}$$

A 端比 B 端高出正 1.5 V。

关于电压源串联有一个常见的例子是手电筒。给手电筒装上两节 1.5 V 的电池，它们是串联的，总共提供了 3 V 的电压。当串联上电池或其他的电压源来增加总电压的时候，通常把其中一个的正极连接到另 一个的负极上，如图 5.24 所示。

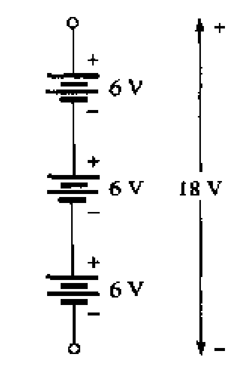


图 5.24　三个 6 V 的电池串联得到 18 V

以下两个例题阐述了总电压源的计算方法。

例 5.11　如图 5.25 所示的电路中，电压源的总电压($V_{S(tot)}$)是多少？

解：各个电压源的极性是相同的(在电路中电压源是按相同方向连接的)，所以把这三个电压相加得到总电压：

$$V_{S(tot)} = V_{S1} + V_{S2} + V_{S3} = 10\ \text{V} + 5\ \text{V} + 3\ \text{V} = \mathbf{18\ V}$$

这三个独立的电压源可以用一个 18 V 的等价电压源来代替，它的极性如图 5.26 所示。

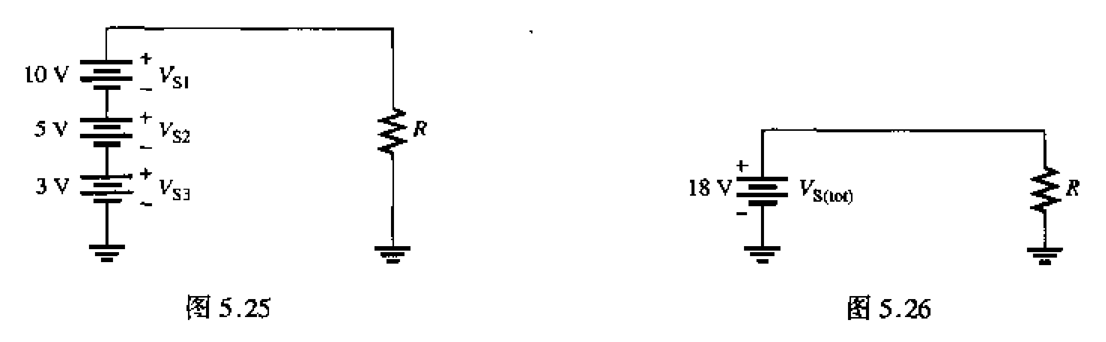


图 5.25　　图 5.26

练习：如果图 5.25 中的电压源 V_{S3} 翻转过来，电压源的总电压是多大？

例 5.12　在如图 5.27 所示的电路中，求 $V_{S(tot)}$。

解：这里的电压源按相反的方向连接。如果按电路的顺时针方向，首先是从 V_{S1} 的正极到负极，再从 V_{S2} 的负极到正极。总电压是这两个电压源的差(不同符号值的代数和)，它的极性同值较大的电压源的极性一致，这里选择 V_{S2} 的极性方向。

$$V_{S(tot)} = V_{S2} - V_{S1} = 25\ \text{V} - 15\ \text{V} = \mathbf{10\ V}$$

图 5.27 中的两个电压源可以用一个 10 V 的等效电压源代替，极性如图 5.28 所示。

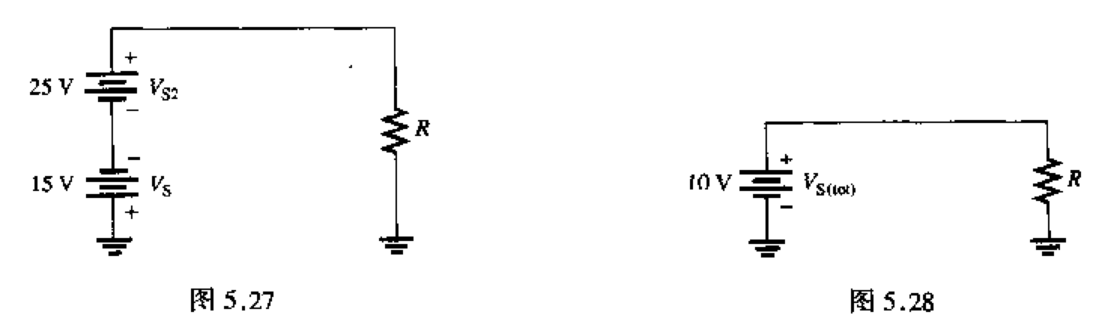


图 5.27　　图 5.28

练习：如果图 5.27 中再串联一个方向和 V_{S1} 相同的 8 V 电源，求 $V_{S(tot)}$ 是多少？

5.5 节练习

1. 若手电筒的四节 1.5 V 的电池从正极到负极串联,则这四节电池的总电压是多少?
2. 需要多少节 12 V 的电池串联才能提供 60 V 的电压?画出原理图说明电池是如何连接的。
3. 图 5.29 所示的电阻电路,用做晶体管放大器的偏置电压电路。说明如何连接两个 15 V 的电源,使得两个电阻上的电压都是 30 V。
4. 如图 5.30 所示,求每幅图中的电源总电压。
5. 如图 5.30 所示,画出每幅图的等效单个电源的电路。

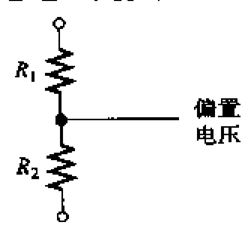




图 5.29

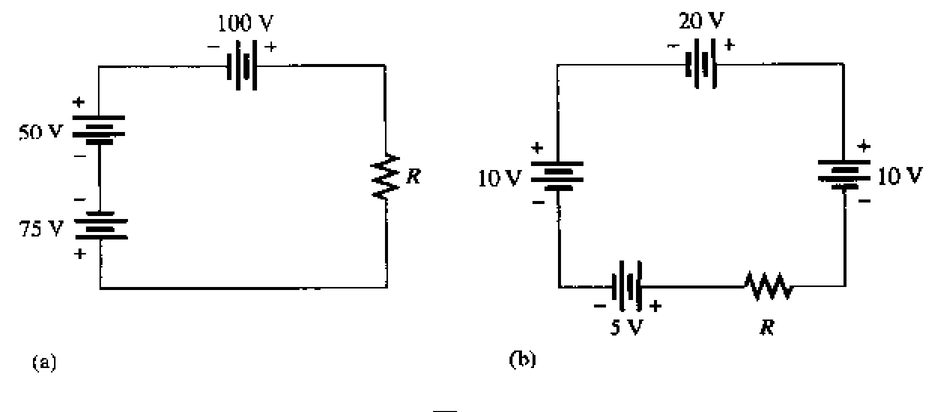


图 5.30

5.6 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律是一个基本的电路定律,表述为一个闭合回路中电压的代数和为零。换句话说,电压降的总和等于电源的总电压。

学完本节后读者应该能够:

- 掌握基尔霍夫电压定律的应用
- 熟悉基尔霍夫电压定律的表述
- 通过电压降相加求电源的总电压
- 确定一个未知的电压降

在一个电路中,电阻上分布的电压(电压降)的极性通常和电压源的极性相反。例如,如图 5.31 所示,顺着电路的顺时针方向,注意电源的极性从负到正,而每个电压降都是从正到负。还要到注意每个电阻的电压降是用 V_1, V_2 等来表示的。

还要注意的是,如图 5.31 所示,电流从电源的正极流出,按照箭头指示的方向流过电阻。电流从每个电阻的正极流入,从负极流出。一个电阻能级的下降产生电势差,或者电压降,极性是沿着电流的方向从正到负。

注意在图 5.31 所示的电路中,从点 A 到点 B 的电压等于电源的电压 V_S。而且,从点 A 到点 B 的电压等于串联电阻电压降的总和。因此,电源的电压等于三个电压降的总和。

以下是基尔霍夫电压定律的一个例子的讨论,其一般表述如下:

单一闭合回路的电路所示,电压降的总和等于这个回路中电源的总电压。

基尔霍夫电压定律的基本概念图解如图5.32所示，表达式如式(5.3)所示：

$$V_S = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n \tag{5.3}$$

其中，下标 n 代表电压降的个数。

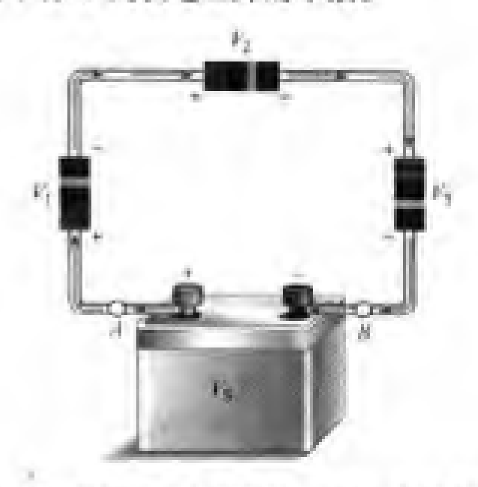


图5.31 基尔霍夫电压定律：通过一个闭合回路电路电压降的总和等于电源的电压

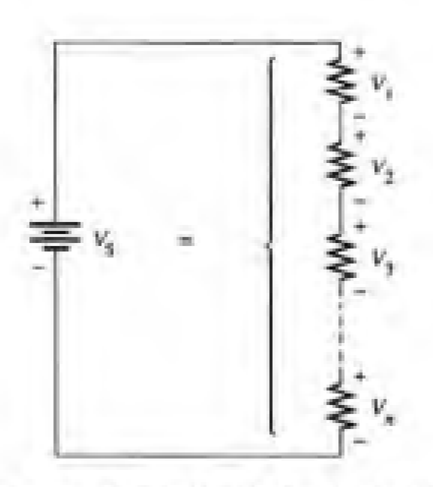


图5.32 电压降的总和等于电源电压

5.6.1 基尔霍夫电压定律的另一种表述

把一个闭合回路中的所有电压降相加，得到的总和减去电源电压，其结果为零。产生这个结果的原因是，电压降的和总等于电源的电压。

一个闭合回路内，所有电压(包括电源和电压降)的代数和为零。

因此，基尔霍夫电压定律另一种表述的公式如下：

$$V_S - V_1 - V_2 - V_3 - \cdots - V_n = 0 \tag{5.4}$$

通过连接一个电路，然后测量各电阻的电压和电源电压，可以验证基尔霍夫电压定律，如图5.33所示。将电阻的电压加到一起，它们的和等于电源的电压。可以添加任意个数的电阻。

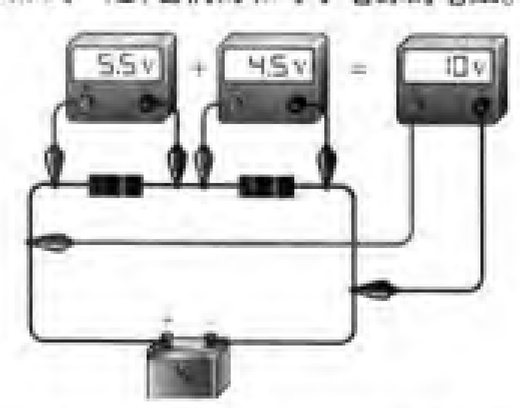


图5.33 基尔霍夫电压定律的实验证明

接下来的三个例子应用了基尔霍夫电压定律来解决电路问题。

例5.13 如图5.34所示，求电源电压 V_S。其中两个电压降已知，保险丝上没有电压降。

解：根据基尔霍夫电压定律(参见图5.3)，电源电压(施加的电压)等于电压降的总和。将电压降相加，求得电源电压的值：

$$V_S = 5\ \text{V} + 10\ \text{V} = \mathbf{15\ V}$$

练习:如果 V_S 增加到 30 V,求这两个电压降是多少?

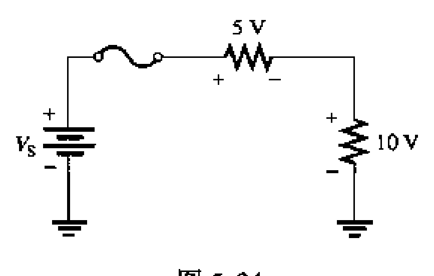


图 5.34

例 5.14 如图 5.35 所示,求未知的电压降 V_3。

解:根据基尔霍夫电压定律,电路中所有电压的代数和为零。除了 V_3 之外每个电压降的值都是已知的.将这些值代入公式:

$$-V_{S2} + V_{S1} - V_1 - V_2 - V_3 = 0$$
$$-15\ \text{V} + 50\ \text{V} - 12\ \text{V} - 6\ \text{V} - V_3 = 0\ \text{V}$$

接着,把已知的值求和,再把 17 V 移到式子的右边,去掉负号:

$$17\ \text{V} - V_3 = 0\ \text{V}$$
$$-V_3 = -17\ \text{V}$$
$$V_3 = \mathbf{17\ V}$$

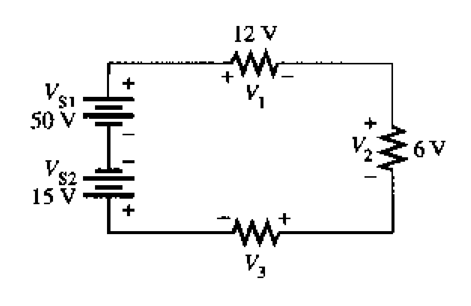


图 5.35

分布在 R_3 上的电压降为 17 V,它的极性如图 5.35 所示。

练习:如果图 5.35 中 V_{S2} 的极性翻转过来,试确定 V_3。

例 5.15 电路如图 5.36 所示,求 R_4 的值。

解:在这个问题中,我们将同时用到欧姆定律和基尔霍夫电压定律。首先用欧姆定律求出各已知电阻的电压降:

$$V_1 = IR_1 = (200\ \text{mA})(10\ \Omega) = 2.0\ \text{V}$$
$$V_2 = IR_2 = (200\ \text{mA})(47\ \Omega) = 9.4\ \text{V}$$
$$V_3 = IR_3 = (200\ \text{mA})(100\ \Omega) = 20\ \text{V}$$

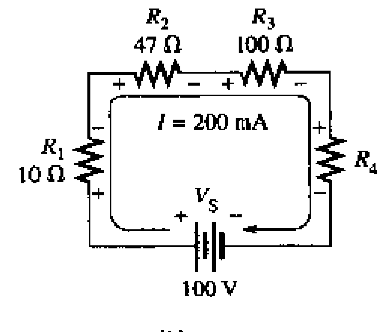


图 5.36

接着,用基尔霍夫电压定律求 V_4,即未知电阻上的电压降:

$$V_S - V_1 - V_2 - V_3 - V_4 = 0\ \text{V}$$
$$100\ \text{V} - 2.0\ \text{V} - 9.4\ \text{V} - 20\ \text{V} - V_4 = 0\ \text{V}$$
$$68.6\ \text{V} - V_4 = 0\ \text{V}$$
$$V_4 = 68.6\ \text{V}$$



最后,已知 V_4,用欧姆定律计算 R_4:

$$R_4 = \frac{V_4}{I} = \frac{68.6\ \text{V}}{200\ \text{mA}} = \mathbf{343\ \Omega}$$

它很有可能是一个 330 Ω 的电阻,因为 343 Ω 在 330 Ω 的允许误差范围(+5%)之内。

练习:如图 5.36 所示,已知 $V_S = 150$ V 且 $I = 200$ mA,试确定 R_4。

5.6 节练习

1. 给出基尔霍夫电压定律的两种表述。
2. 已知一个串联电阻的电路中,电源电压是 50 V,那么电路中的电压降之和是多少?
3. 已知两个等阻值电阻和一个 10 V 的电池串联,则每个电阻上的电压降是多少?
4. 已知电源电压是 25 V 的串联电路中有三个电阻,其中一个电压降为 5 V,另一个为 10 V,那么第三个电压降的值是多少?
5. 已知一个串联电路上的各个电压降分别为 1 V,3 V,5 V,8 V 和 7 V,那么施加在这个串联电路上的总电压是多少?

5.7 分压器

串联电路可以作为一个分压器。这里读者将学到分压器这个术语的意思，以及为什么分压器是串联电路的一个重要应用。

学完本节后读者应该能够：

- 将串联电路作为分压器
- 应用分压公式
- 将电位器作为可调的分压器
- 描述分压器的一些应用。

为了说明串联电路如何实现分压器的功能，先来考查图5.37，图中有两个电阻串联。共有两个电压降分布在这两个电阻上，一个分布在R_1上，另一个分布在R_2上。两个电压降V_1和V_2已经分别在示意图里指出。

由于流入每个电阻的电流一样，因此电压降和电阻的阻值成正比。例如，如果R_2的值是R_1的两倍，那么V_2的值是V_1的两倍。换句话说，分布在各串联电阻上的总电压降，在数值上是和电阻值成正比的。

例如在图5.37中，如果V_S是10 V，R_1是50 Ω，R_2是100 Ω，那么V_1是总电压的三分之一，即3.33 V，因为R_1是总电阻150 Ω的三分之一。同理，V_2是V_S的三分之二，即6.67 V。

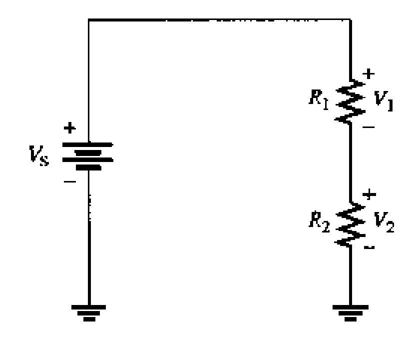


图5.37 两个电阻的分压器

5.7.1 分压公式

通过少量的计算，就可以得出决定电压如何在串联电阻上分布的公式。假设有几个电阻串联，如图5.38所示。这幅图中是以5个电阻为例，当然数量可以是任意的。

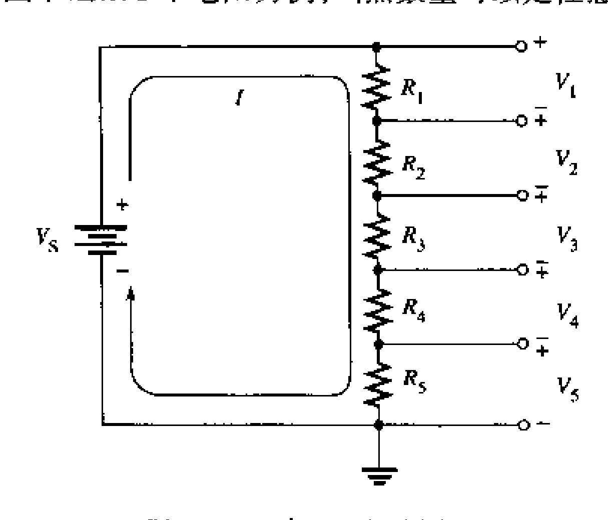


图5.38 5个电阻的分压器

将任意一个电阻上的电压降命名为V_x，其中x代表特定电阻的序号(1,2,3等)。根据欧姆定律，图5.38中任意电阻上的电压降可以写成下式：

$$V_x = IR_x$$

其中,$x = 1,2,3,4$ 或 5。

电流等于电压源除以总电阻($I = V_S/R_T$)。例如,在图 5.38 所示的电路中,总电阻为 $R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$。把 I 换成 V_S/R_T 代入表达式,则 V_x 的结果为:

$$V_x = \left(\frac{V_S}{R_T}\right) R_x$$

整理各项,得到:

$$V_x = \left(\frac{R_x}{R_T}\right) V_S \tag{5.5}$$

式(5.5)是一般的分压公式,可以表述如下:

串联电路中任意电阻或电阻组合上的电压降,等于该电阻值占总电阻的比例和电源电压的乘积。

接下来的三个例子说明了分压公式的应用。

例 5.16 如图 5.39 所示,求分压器的 V_1(R_1 上的电压)和 V_2(R_2 上的电压)是多少?

解: 利用分压公式:$V_x = (R_x/R_T)V_S$,其中 $x = 1$,可以确定 V_1。总电阻为:

$$R_T = R_1 + R_2 = 100\ \Omega + 56\ \Omega = 156\ \Omega$$

R_1 为 100 Ω,V_S 为 10 V,把这些值代入分压公式:

$$V_1 = \left(\frac{R_1}{R_T}\right) V_S = \left(\frac{100\ \Omega}{156\ \Omega}\right) 10\ \text{V} = \mathbf{6.41\ V}$$

图 5.39

有两种方法可以求得 V_2:基尔霍夫电压定律和分压公式。如果应用基尔霍夫电压定律($V_S = V_1 + V_2$),把 V_S 和 V_1 的值代入,如下式所示:

$$V_2 = V_S - V_1 = 10\ \text{V} - 6.41\ \text{V} = \mathbf{3.59\ V}$$

求 V_2 的第二种方法是应用分压公式,其中 $x = 2$。

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_T}\right) V_S = \left(\frac{56\ \Omega}{156\ \Omega}\right) 10\ \text{V} = \mathbf{3.59\ V}$$

练习: 在图 5.39 中,如果 R_2 的值变为 180 Ω,求分布在 R_1 和 R_2 上的电压分别是多少?

例 5.17 如图 5.40 所示,求分压器中每个电阻上的电压降分别是多少?

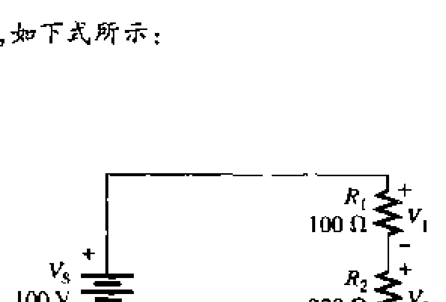


图 5.40

解: 观察这个电路,并考虑如下问题:总电阻是 1000 Ω,那么 R_1 上的电压降为总电压的 10%,因为它占总电阻的 10%(100 Ω 是 1000 Ω 的 10%)。同样,总电压的 22% 消耗到了电阻 R_2 上面,因为 R_2 占总电阻的 22%(220 Ω 为 1000 Ω 的 22%)。最后,R_3 上的电压降为总电压的 68%,因为 680 Ω 是 1000 Ω 的 68%。

由于在这个问题中的数值比较简单,所以用口算就可以很容易地得出电压。($V_1 = 0.10 \times 100\ \text{V} = 10\ \text{V}$,$V_2 = 0.22 \times 100\ \text{V} = 22\ \text{V}$,$V_3 = 0.68 \times 100\ \text{V} = 68\ \text{V}$。)事实并不总是这样,但有时稍加考虑,便可以更有效并用更少的计算得出结果。这也是一种判断应该得到什么结果的好方法,这样你会识别出由于计算错误而导致的不合理的结果。

尽管通过这样思考的问题的答案已经很明显，我们还是用计算来验证上面的结果。

$$V_1=\left(\frac{R_1}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{100\ \Omega}{1000\ \Omega}\right)100\ \text{V}=\mathbf{10\ V}$$

$$V_2=\left(\frac{R_2}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{220\ \Omega}{1000\ \Omega}\right)100\ \text{V}=\mathbf{22\ V}$$

$$V_3=\left(\frac{R_3}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{680\ \Omega}{1000\ \Omega}\right)100\ \text{V}=\mathbf{68\ V}$$

注意，根据基尔霍夫电压定律，总的电压降等于电压源。这是一种检验结果的很好的方法。

练习：如果在图 5.40 中的 R_1 和 R_2 都变为 680 Ω，那么电压降为多少？

例 5.18　电路如图 5.41 所示的分压器上，以下两点间的电压是多少？

(a) A 到 B　(b) A 到 C　(c) B 到 C　(d) R 到 D　(e) C 到 D

解：首先，确定 R_T：

$$R_T=R_1+R_2+R_3=1.0\ \text{k}\Omega+8.2\ \text{k}\Omega+3.3\ \text{k}\Omega=12.5\ \text{k}\Omega$$

接着，利用分压公式，可得每个需要的电压值：

(a)从 A 到 B 之间 R_1 上的电压降为：

$$V_{AB}=\left(\frac{R_1}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{1.0\ \text{k}\Omega}{12.5\ \text{k}\Omega}\right)25\ \text{V}=\mathbf{2\ V}$$

(b)从 A 到 C 的电压是 R_1 和 R_2 上电压降的和。在这种情况下，R_x 在式(5.5)中为 R_1+R_2：

$$V_{AC}=\left(\frac{R_1+R_2}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{9.2\ \text{k}\Omega}{12.5\ \text{k}\Omega}\right)25\ \text{V}=\mathbf{18.4\ V}$$

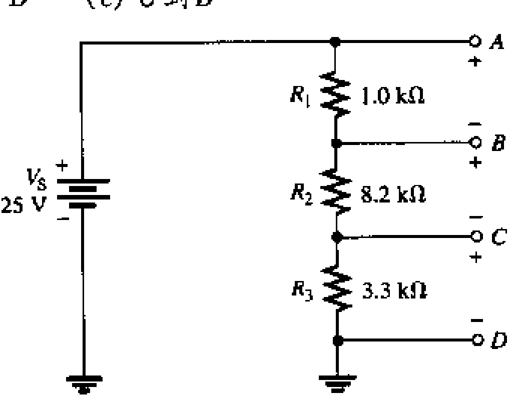


图 5.41

(c)从 B 到 C 的电压是 R_2 上的电压降：

$$V_{BC}=\left(\frac{R_2}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{8.2\ \text{k}\Omega}{12.5\ \text{k}\Omega}\right)25\ \text{V}=\mathbf{16.4\ V}$$

(d)从 B 到 D 的电压是 R_2 和 R_3 上的电压降的和。在这种情况下，R_x 在一般公式中为 R_2+R_3：

$$V_{BD}=\left(\frac{R_2+R_3}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{11.5\ \text{k}\Omega}{12.5\ \text{k}\Omega}\right)25\ \text{V}=\mathbf{23\ V}$$

(e)最后，从 C 到 D 的电压是 R_3 上的电压降：

$$V_{CD}=\left(\frac{R_3}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{3.3\ \text{k}\Omega}{12.5\ \text{k}\Omega}\right)25\ \text{V}=\mathbf{6.6\ V}$$

如果在实验室中连接这个分压器，能够通过在合适的测试点之间连接电压表，以验证每一个计算的电压值。

练习：若 V_S 变为原来的两倍，计算之前算这的每一个电压值。

5.7.2　将电位器作为可调的分压器

第 2 章提到过，电位器是一个有 3 个端口的可变电阻。将一个电位器连接到一个电压源上，实物连接图如图 5.42(a)所示，原理图如图 5.42(b)所示。注意，两个终端标注为 1 和 2，可变端或触点标注为 3。电位器起到了**分**压器的功能，可以通过把总电阻**分**为两部分来说明，如图 5.42(c)所示。在1 端和 3 端之间的电阻(R_{13})是一部分，在 3 端和 2 端之间的电阻(R_{32})是另一部分，所以这个电位器相当于一个可以手调的两电阻分压器。

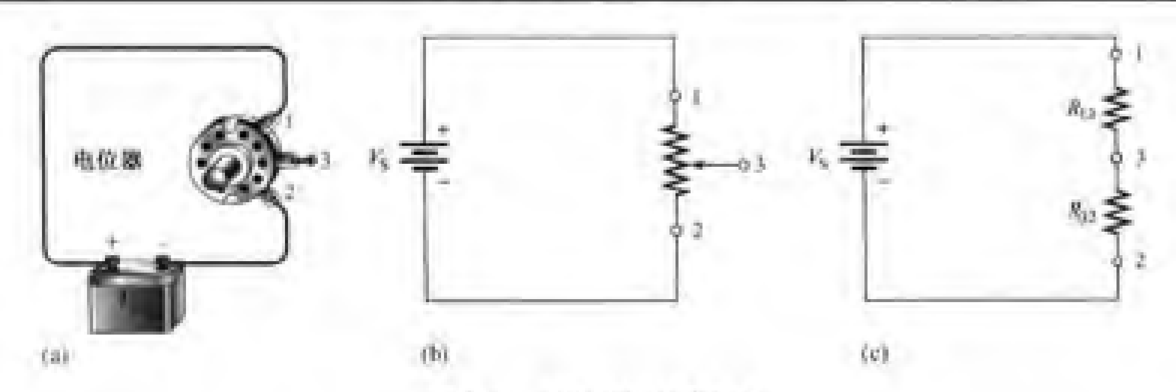


图 5.42 电位器作为分压器

图 5.43 说明了触点(3)移动时发生的情况。在图 5.43(a)中，触点正好在中间，使得两个电阻相等。如果测量 3 端到 2 端的电压，如伏特表的读数所示，将是电源总电压的一半。触点向上移动的时候，如图 5.43(b)所示，3 端到 2 端之间的电压增加了，而且分布的电压是成正比增加的。触点向下移动的时候，如图 5.43(c)所示，3 端到 2 端之间的电压降低了，而且电压线性地降低。

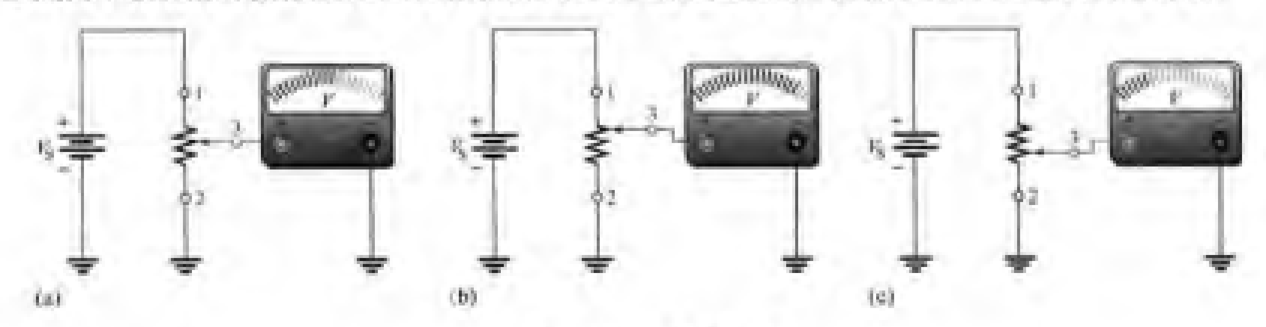


图 5.43 可调分压器

5.7.3 分压器的应用

收音机、电视接收机的音量控制都是电位器作为分压器的常见应用。因为声音的响度取决于和音频信号有关的电压的大小，所以可以通过调节电位器(也就是旋转设备上的音量控制旋钮)来增大或减小音量。图 5.44 所示的模块说明，在一个典型的接收机上电位器如何用于音量控制的。

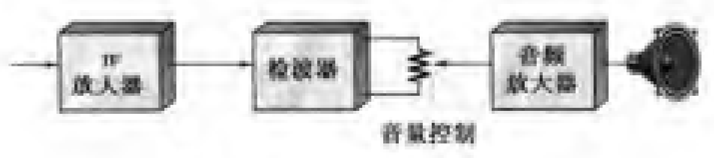


图 5.44 分压器用于音量控制

图 5.45 所示的是分压器的另一个应用，是可调分压器用做汽车油箱中燃油量的传感器。图 5.45(a)中，油箱注满时浮标上移；油箱空时浮标下移。浮标和电位器的触点杆机械相连，如图 5.45(b)所示。输出电压随着触点位置的改变而相应地改变。当油箱中的燃油减少时，传感器的输出电压也减少。输出电压传到指示电路，该电路控制燃油量检测或显示燃油量数字，此系统的示意图如图 5.45(c)所示。

分压器还有一个应用是调节直流工作电压(分压)的晶体管放大器，该应用如图 5.46 所示。后面将学到晶体管放大器和分压，因此，这里理解分压器的基础知识是很重要的。

这些例子只是分压器很多可能应用中的三种。

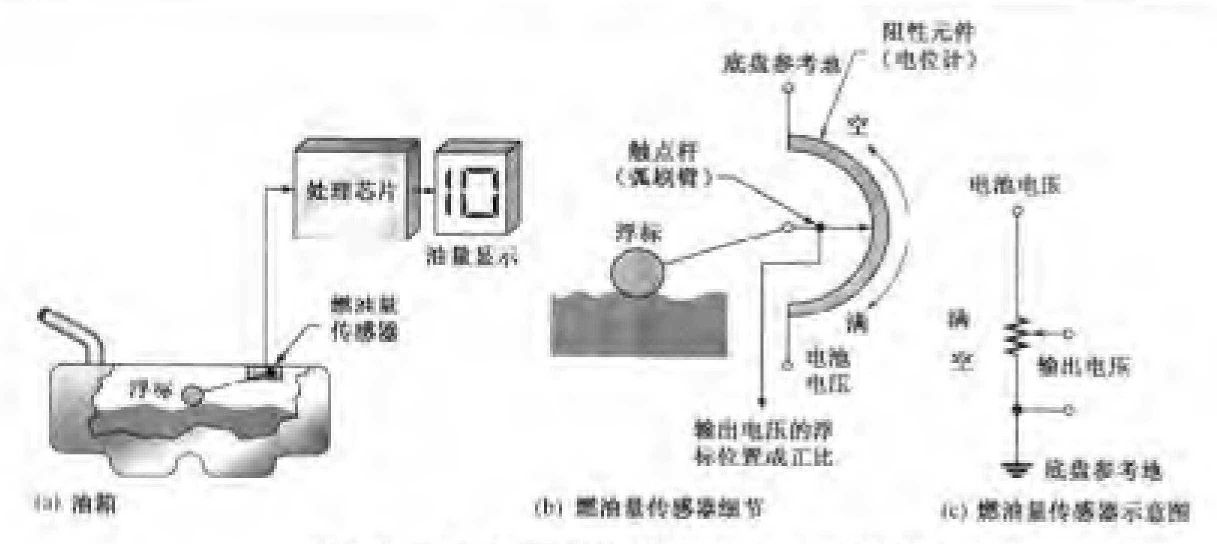


图5.45 可调分压器用做汽车油箱中燃油量的传感器

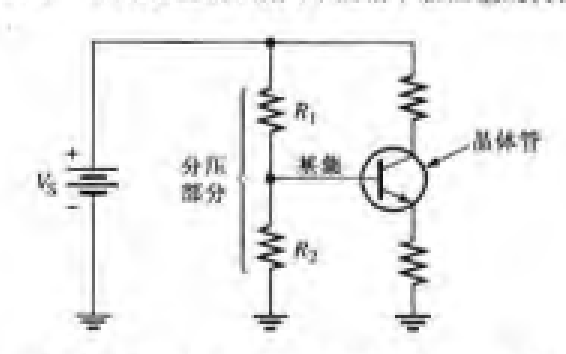


图5.46 分压器是一个晶体管放大器分压电路，其中晶体管基极的电压值取决于分压器：$V_{base}=(R_2/(R_1+R_2))V_S$

5.7节练习

1. 什么是分压器？
2. 串联分压器电路中可以串联多少个电阻？
3. 写出一般的分压公式。
4. 两个等阻值的电阻和一个10 V的电源串联，分布在每个电阻上的电压是多少？
5. 已知电源电压是100 V，一个47 Ω和一个82 Ω的电阻连成分压器。画出电路，并求每个电阻上的电压是多少？
6. 图5.47所示的是一个可调分压器。如果电位器是线性的，为使A、B之间是5 V，且B、C之间也是5 V，电位器的触点应放置在哪里？

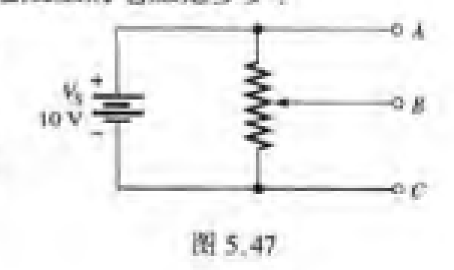


图5.47

5.8 串联电路中的功率

串联电路中各个电阻消耗的功率构成了电路的总功率，各个电阻的功率可以相加。学完本节，读者应该能够：

■ 求串联电路的功率

串联电阻电路中的总功率等于各个串联电阻功率的总和。

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n \tag{5.6}$$

其中,P_T 是总功率,P_n 是串联中最后一个电阻的功率。换句话说,功率具有可加性。

当然,第 4 章中学到的功率公式可以直接代入串联电路。因为通过每个串联电阻的电流是一样的,所以在计算总功率时经常使用以下几个公式:

$$P_T = V_S I$$

$$P_T = I^2 R_T$$

$$P_T = \frac{V_S^2}{R_T}$$

其中,V_S 是分布在串联线路上的总电源电压,R_T 是总电阻。例 5.19 说明了如何计算串联电路的总功率。

例 5.19 如图 5.48 所示,求串联电路中的总功率。

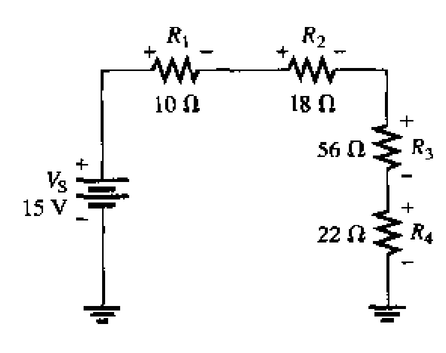


图 5.48

解:电源电压是 15 V,总电阻是:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 10\ \Omega + 18\ \Omega + 56\ \Omega + 22\ \Omega = 106\ \Omega$$

已知 V_S 和 R_1,最简单的公式是 $P_1 = V_S^2/R_1$:

$$P_T = \frac{V_S^2}{R_T} = \frac{(15\ \text{V})^2}{106\ \Omega} = \frac{225\ \text{V}^2}{106\ \Omega} = 2.12\ \text{W}$$

如果单独计算每个电阻的功率,然后将所有的功率相加,可以得到相同的结果。首先求出电流:

$$I = \frac{V_S}{R_T} = \frac{15\ \text{V}}{106\ \Omega} = 142\ \text{mA}$$

接着,利用 $P = I^2 R$ 计算每个电阻的功率:

$$P_1 = I^2 R_1 = (142\ \text{mA})^2(10\ \Omega) = 200\ \text{mW}$$

$$P_2 = I^2 R_2 = (142\ \text{mA})^2(18\ \Omega) = 360\ \text{mW}$$

$$P_3 = I^2 R_3 = (142\ \text{mA})^2(56\ \Omega) = 1.12\ \text{W}$$

$$P_4 = I^2 R_4 = (142\ \text{mA})^2(22\Omega) = 441\ \text{mW}$$

然后,将这些功率相加,得到总功率:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 200\ \text{mW} + 360\ \text{mW} + 1.12\ \text{W} + 441\ \text{mW} = \mathbf{2.12\ W}$$

比较这个结果和刚才通过公式 $P_T = V_S^2/R_T$ 得到的总功率。

练习:图 5.48 中如果 V_S 增加到 30 V,电路的功率是多少?

电阻的功率是很重要的,因为电阻的额定功率必须足够高,用于满足电路的预期功率。下面的例子将说明串联电路中涉及到功率的一些实际问题。

例 5.20 如图 5.49 所示,判断每个电阻的标称额定功率($\frac{1}{2}$ W)是否满足实际功率。如果额定值不够,求出要求的最小额定值是多少?

解:首先求出总电阻:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 1.0\ \text{k}\Omega + 2.7\ \text{k}\Omega + 910\ \Omega + 3.3\ \text{k}\Omega = 7.91\ \text{k}\Omega$$

接着计算电流:

$$I = \frac{V_S}{R_T} = \frac{120\ \text{V}}{7.91\ \text{k}\Omega} = 15\ \text{mA}$$

然后，计算每个电阻的功率：

$$P_1 = I^2R_1 = (15\ \text{mA})^2(1.0\ \text{k}\Omega) = \mathbf{225\ mW}$$
$$P_2 = I^2R_2 = (15\ \text{mA})^2(2.7\ \text{k}\Omega) = \mathbf{608\ mW}$$
$$P_3 = I^2R_3 = (15\ \text{mA})^2(910\ \Omega) = \mathbf{205\ mW}$$
$$P_4 = I^2R_4 = (15\ \text{mA})^2(3.3\ \text{k}\Omega) = \mathbf{743\ mW}$$

R_2 和 R_4 没有足够的额定值提供实际的功率，两个电阻的实际功率都超过了 $\frac{1}{2}$ W。如果合上开关，它们将被烧毁，应该用 1 W 的电阻代替。

练习：如果图 5.49 中的电源电压增加到 240 V，求每个电阻的最小额定功率要求是多少？

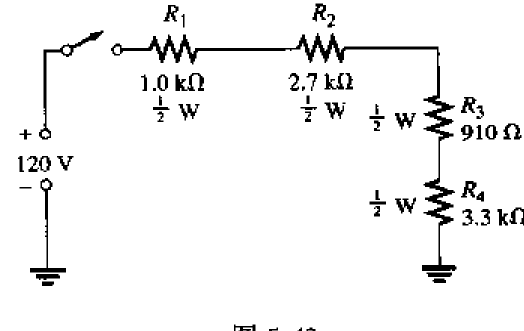


图 5.49

5.8 节练习

1. 如果已知串联电路中每个电阻的功率，如何求出总功率？
2. 串联电路中，已知电阻消耗的功率分别是 2 W，5 W，1 W 和 8 W，求电路的总功率是多少？
3. 一个电路由 1 个 100 Ω 的电阻、1 个 330 Ω 的电阻和 1 个 680 Ω 的电阻串联，已知通过电路的电流是 1 A，那么总功率是多少？

5.9　电路接地

电压是相对的，也就是说，电路中一点的电压总是相对另一点来测量的。例如，如果说电路中某一点的电压是 +100 V，就是指该点相对于电路中的指定参考点是正 100 V。通常，参考点是接地点。

学完本节后读者应该能够：

- 确定电路中的接地点
- 相对于接地点测量电压
- 定义电路接地的术语

第 2 章中已经介绍了接地的概念。在很多电子设备中，印刷电路板或者金属外壳上有很大的导通区域可作为公共点或参考点，称为电路接地或底座接地，如图 5.50 所示。

接地点默认为零电压(0 V)，电路中其余点都是相对它而言，如图 5.51 所示。在 5.51(a)中，电源的负极接地。相对参考地而言，标示的所有电压都是正的。在图 5.51(b)中，电源的正极接地。因此，相对地参考而言，其余的电压都是负的。记住，电路中所有接地的点都是通过参考地连接在一起的，在电路上等效于同一点。

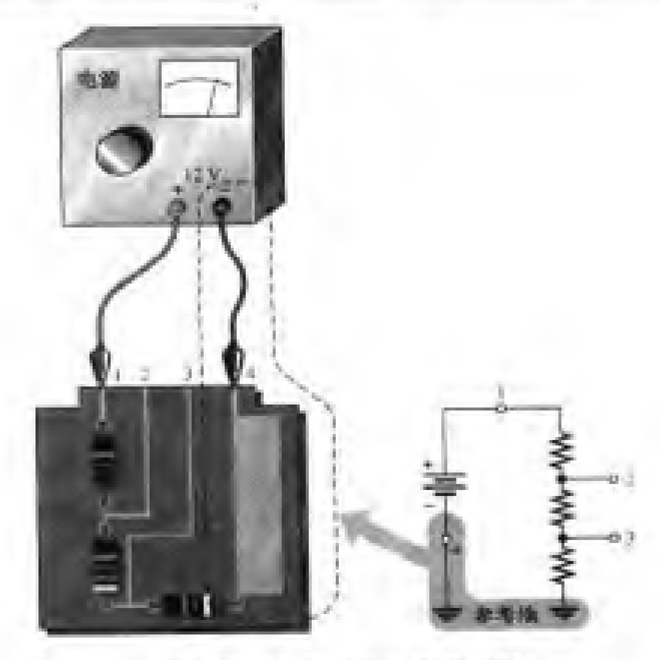


图 5.50　电路接地的简单示图

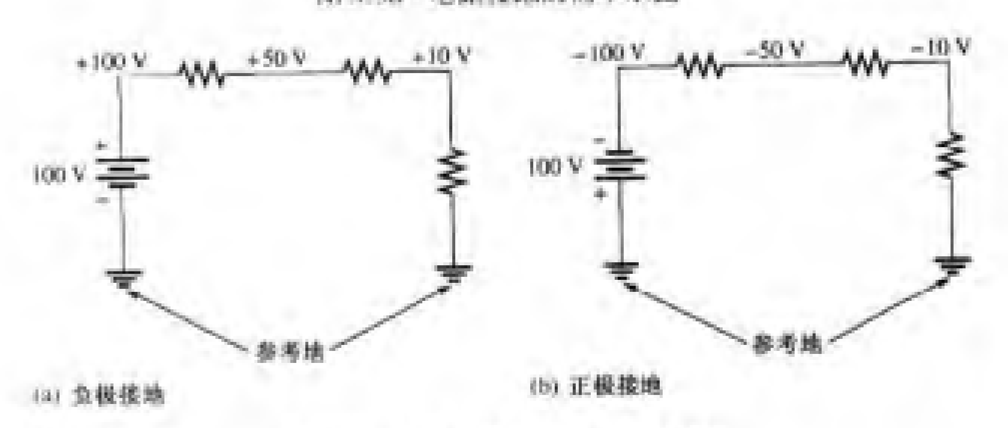


图 5.51　负极接地和正极接地的实例

5.9.1　对地的电压测量

若电路中的测量电压是相对地而言的，那么仪表的一端连接到电路的参考地，另一端连接到被测电压的那一点。在负极接地的参考电路中，仪表的负极接到电路参考地，电压表的正极接到正电压的测量点上。正电压的测量如图 5.52 所示，其中电压表的读数是点 A 对地的正电压。

若电路正极接地，电压表的正极连接到地，负极连接到负电压点，如图 5.53 所示。此时，电压表的读数是点 A 对地的负电压。

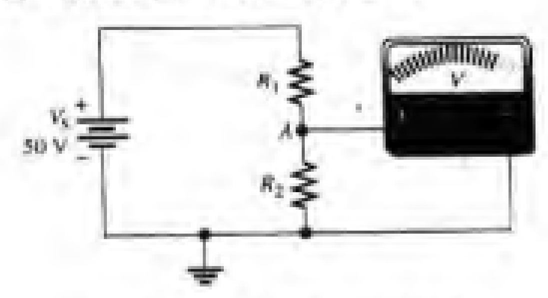


图 5.52　负极接地的电压测量

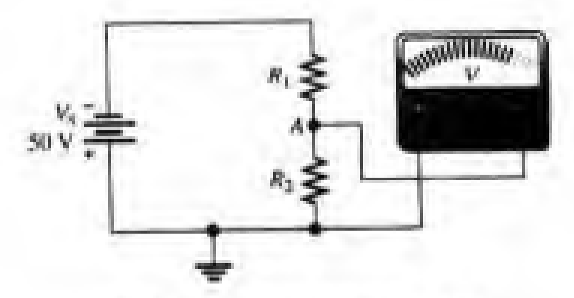


图 5.53　正极接地的电压测量

电路中，测量多点电压时地线端可夹在电路中接地端不动，另一端从一点移动到另一点测量电压。这种方法如图 5.54 的实物图和图 5.55 的等效示意图所示。

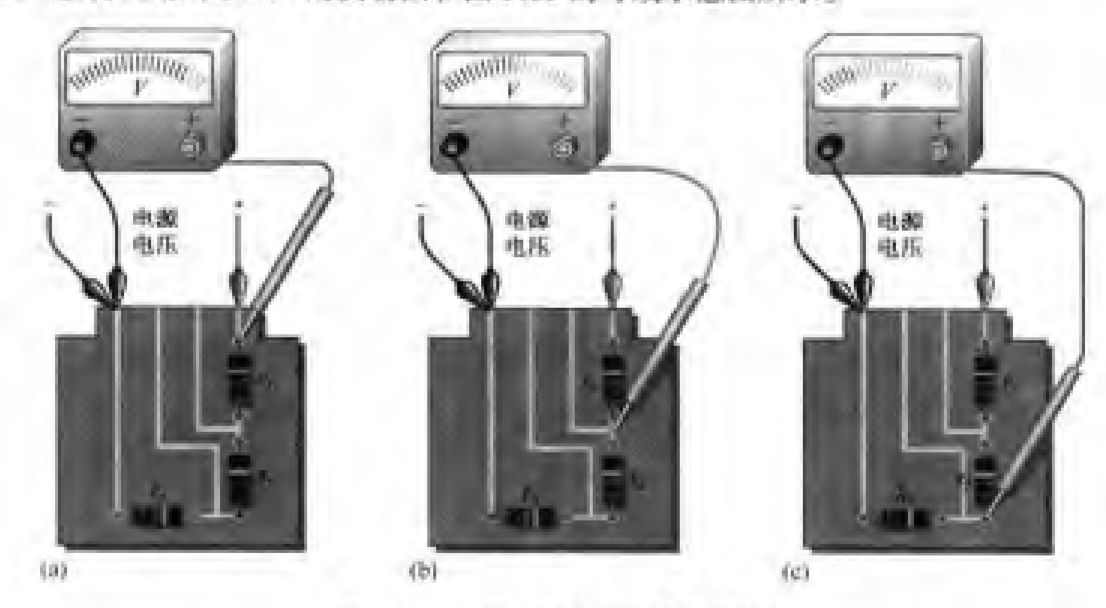


图 5.54 电路中对地电压的多点测量

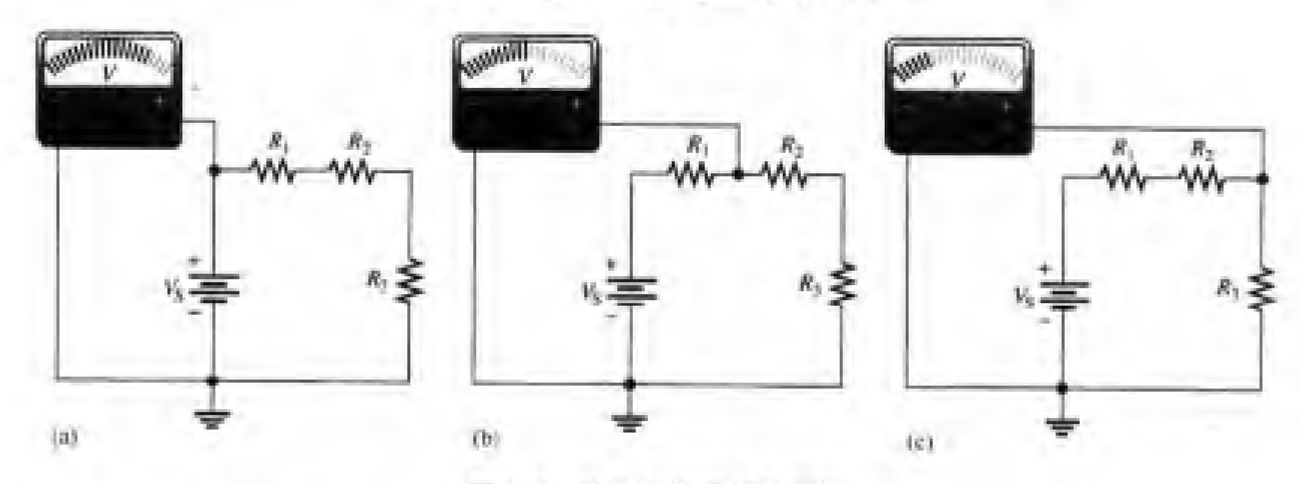


图 5.55 图 5.54 的等效原理图

5.9.2 不接地电阻的电压测量

如图 5.56 所示，电压通常可以通过电阻来测量，这种情况下电阻两端都不接地。在一些比较少见的情况下，电压表不能和电力线的接地端绝缘，电压表的负极将使电阻的一端接地，改变了电路的工作情形。在这种情况下要利用另一种方法测量，如图 5.57 所示。测量电阻每一端的对地电压，两个不同测量值的差就是分布在电阻上的电压降。

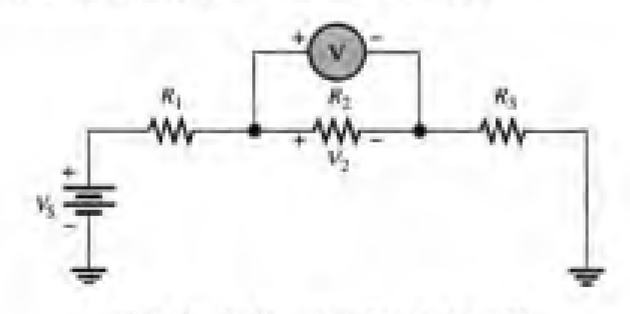
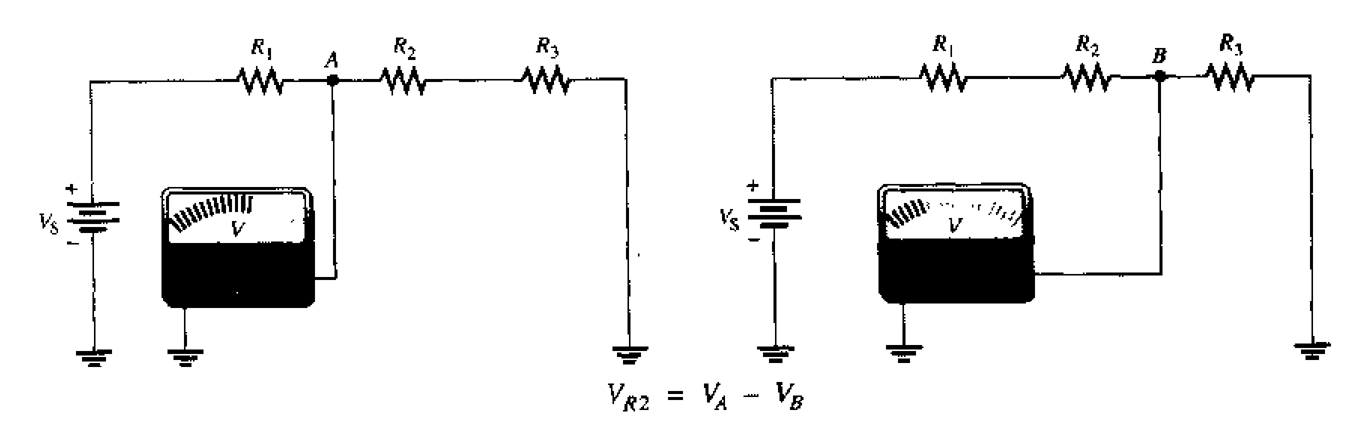


图 5.56 通过一个电阻的电压测量



$$V_{R2} = V_A - V_B$$

图 5.57 通过一个电阻两端的对地电压来测量

例 5.21 图 5.58 所示的每个电路中,求所标示的各个点的电压。假设分布在每个电阻上的电压降是 25 V。

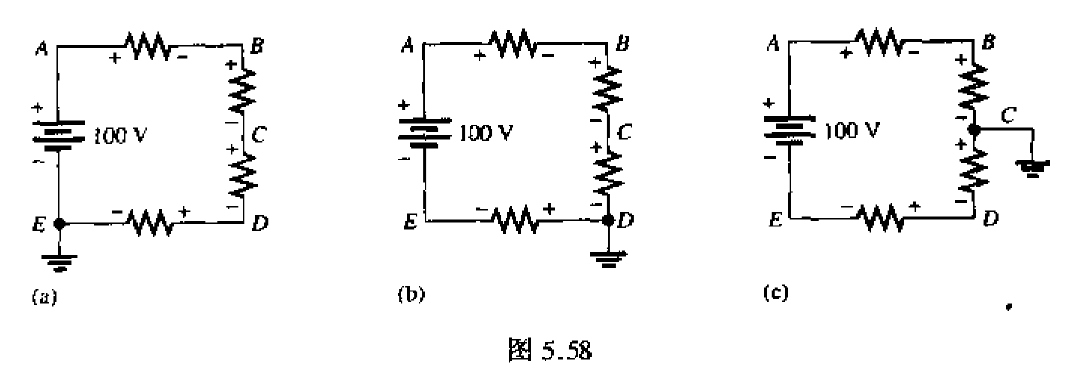


图 5.58

解:在图 5.58(a)所示的电路中,电压的极性如图所示。点 E 是参考地,下方标有单个字母的电压表示该点的对地电压,各点的对地电压如下:

$$V_E = 0\text{ V}, \quad V_D = +25\text{ V}, \quad V_C = +50\text{ V}, \quad V_B = +75\text{ V}, \quad V_A = +100\text{ V}$$

在图 5.58(b)所示的电路中,电压的极性如图所示。点 D 是参考地,各点的对地电压如下:

$$V_E = -25\text{ V}, \quad V_D = 0\text{ V}, \quad V_C = +25\text{ V}, \quad V_B = +50\text{ V}, \quad V_A = +75\text{ V}$$

在图 5.58(c)所示的电路中,电压的极性如图所示。点 C 是参考地,各点的对地电压如下:

$$V_E = -50\text{ V}, \quad V_D = -25\text{V}, \quad V_C = 0\text{ V}, \quad V_B = +25\text{ V}, \quad V_A = +50\text{ V}$$

练习:如果图 5.58 中电路的点 A 接地,那么每个点的对地电压是多少?

5.9 节练习

1. 电路中的公共参考点称为什么?
2. 电路中的电压一般是对地而言的。(对或错)
3. 汽车底盘或仪器外壳经常用于电路接地。(对或错)
4. 接地的符号是什么?

5.10 故障检修

在所有的电路(包括串联电路)中,开路电阻、连线和两点之间短路是很普遍的问题。
学完本节后读者应该能够:

- 进行串联电路的故障检修
- 检查开路电路

- 检查短路电路
- 确定短路的主要原因

5.10.1 开路电路

电路最常见的问题就是开路。例如，一个电阻或一个灯泡烧毁，导致电流通路断开，电路开路，如图 5.59 所示。

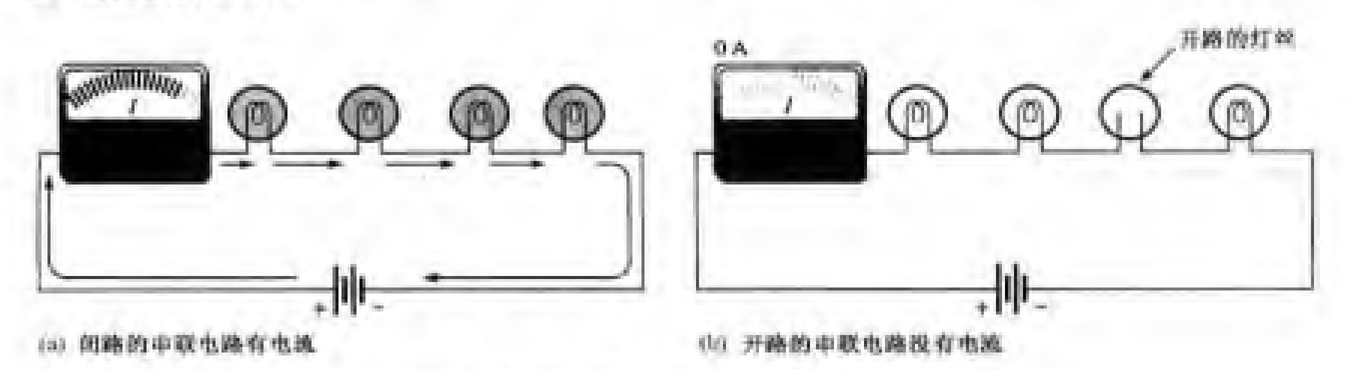


图 5.59 开路的串联电路没有电流

开路的故障检修 第 3 章介绍了如何用分析、计划和测量(APM)方法进行故障检修，也介绍了半分法和利用欧姆表的切割法。这里，利用电压测量代替电阻测量，同样可以应用这些方法。很显然，因为电压测量不用断开任何线路，所以通常是最简便的。

在分析之前，直观检查坏电路是一个很好的办法。有时，烧焦的电阻、烧断的灯丝、不牢固的导线或不牢固的连接可以很容易地观察出来。但是，开路的电阻或其他部分没有明显的损坏迹象也很可能(这种情形更常见)。如果直观检查没有错误，就使用 APM 方法。

如果串联电路开路，所有的电源电压降都出现在开路上。因为开路时串联电路没有电流通路。没有电流，其他任意的电阻(或其他部分)上都没有电压降。因为 $IR = (0\ \text{A})R = 0\ \text{V}$，电阻每一端的电压都是一样的。因此，电路中没有其他电压降，串联链路上的电压同样加在了断开的部分，如图 5.60 所示。根据基尔霍夫电压定律，电源电压就加在断开的电阻上，如下式所示：

$$V_S = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6$$
$$V_4 = V_S - V_1 - V_2 - V_3 - V_5 - V_6 = 10\ \text{V} - 0\ \text{V} - 0\ \text{V} - 0\ \text{V} - 0\ \text{V} - 0\ \text{V}$$
$$V_4 = V_S = 10\ \text{V}$$

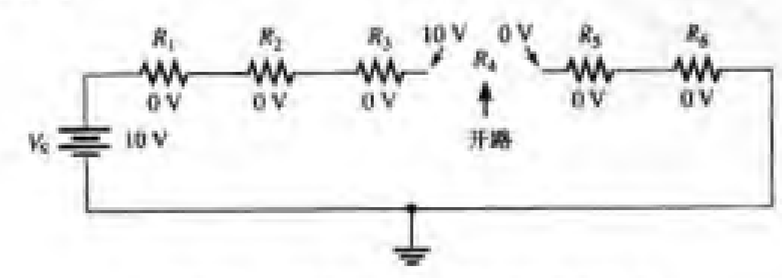


图 5.60 电源电压加在开路的串联电阻上

电压测量半分法的例子 假设电路有 4 个电阻串联。通过分析现象(有电压但无电流)，判断有一个电阻开路。利用电压测量的半分法，设法找到开路的电阻。测量的顺序如图 5.61 所示。

首先测量分布在 R_1 和 R_2 上的(电路的左半部分)电压，读数 0 V 说明没有一个电阻开路。然后，测量 R_3 和 R_4 上的电压，读数 10 V 说明电路的右半部分开路，因此电阻 R_3 或 R_4 中有

个是坏的(假设接线是好的)。如图示的第三步,通过 R_3 的测量值 10 V 说明 R_3 开路。如果已测得 R_4 的读数是 0 V,因为 R_3 是剩下的惟一一个通过 10 V 的电阻,同样可以说明 R_3 是坏的电阻。

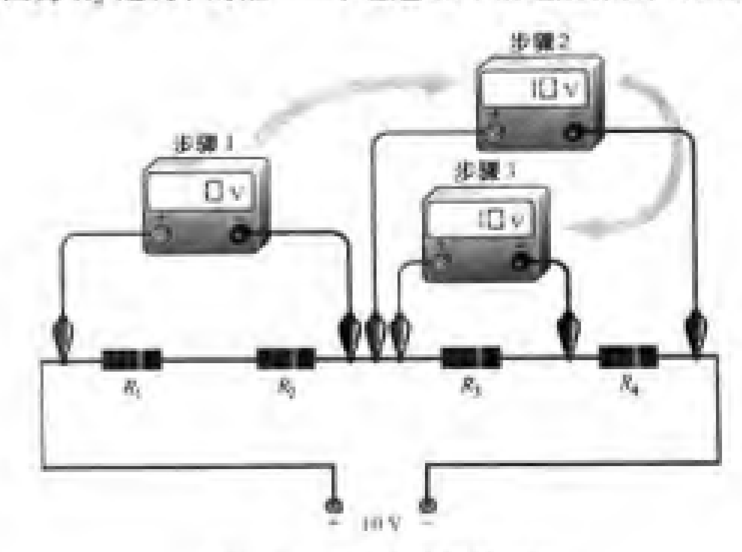


图 5.61 用半分法测量电压

5.10.2 短路电路

有时两个导体接触,或者外部物体(比如焊锡或一根导线)偶然地将电路的两部分连接在一起,就会产生短路。这种情况在高组件密度的电路中是相当普遍的。图 5.62 说明了 PC 板上存在多处短路电路的可能原因。

如果短路,串联电阻的一部分被旁路(所有电流通过短路线),因此减少了总电阻,如图 5.63 所示。注意短路的结果是电流增大。

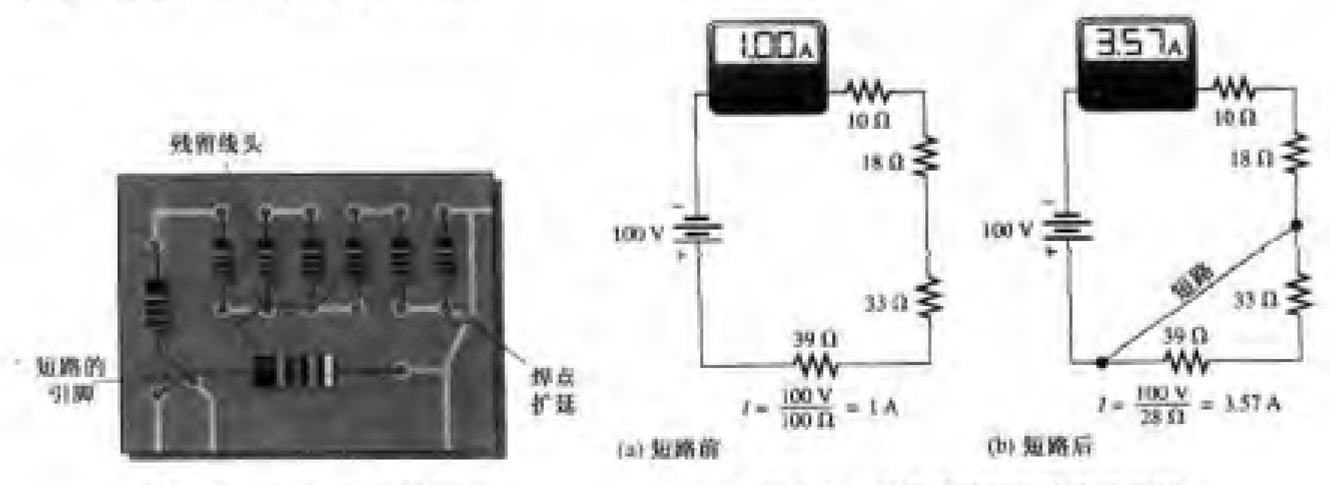


图 5.62 PC 板上短路的例子

图 5.63 串联电路短路的影响示例

短路的故障检修 分析任何故障的时候,直观检查坏电路永远是很好的办法。在短路电路中,经常会发现剪断的导线、溅落的焊锡或导线相接触就是故障所在。元件的短路远少于开路,但是,一般短路的故障检修更困难。而且,电路中一部分的短路会导致另一部分由于短路产生过大的电流而过热,并会由此造成其他部分开路或短路,或同时发生。

但串联电路短路时,短路部分没有电压分布。尽管有时发生短路的是阻值很大的电阻,但短路部分的阻值是零或接近零,这些称为电阻短路。为了便于证明,这里假设所有短路都是零阻值。

分析短路时，可以测量每个电阻上分布的电压，找到读数为0 V的电阻。这是最直接的办法，用半分法。要使用半分法，必须知道电路中每一点的正确电压，将其和实际电压相比较。下面的例子说明如何使用半分法找到短路电路。

例5.22 假设已知由四个电阻串联组成的一个电路的电流比正常值大，可得该电路有一处短路。如果电路正常工作，电路中每点的电压应该如图5.64所示，该电压是对电源的负极而言的。请找到短路处。

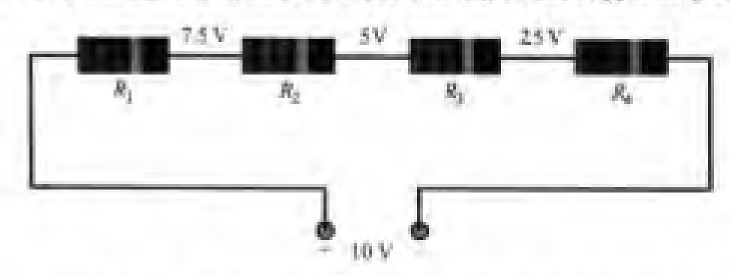


图5.64 标示了正确电压的串联电路(含有短路)

解：使用半分法找到短路电路。首先测量分布在 R_1 和 R_2 上的电压，得到的读数是6.67 V，比正常电压高(正常电压应该是5 V)。找到这个比正常值低的电压，因为短路造成分布在该部分的电压变小。接着测量分布在 R_3 和 R_4 上的电压，得到的读数3.33 V比正常值(应该是5 V)低，说明短路出现在电路的右半部分，R_3 或 R_4 有一个短路。测量得 R_3 的读数是3.3 V，说明 R_4 短路，因为 R_4 必然是0 V电压。图5.65说明了故障检修的步骤。

练习：假设图5.65中的 R_1 短路，第一步测量的结果是多少？

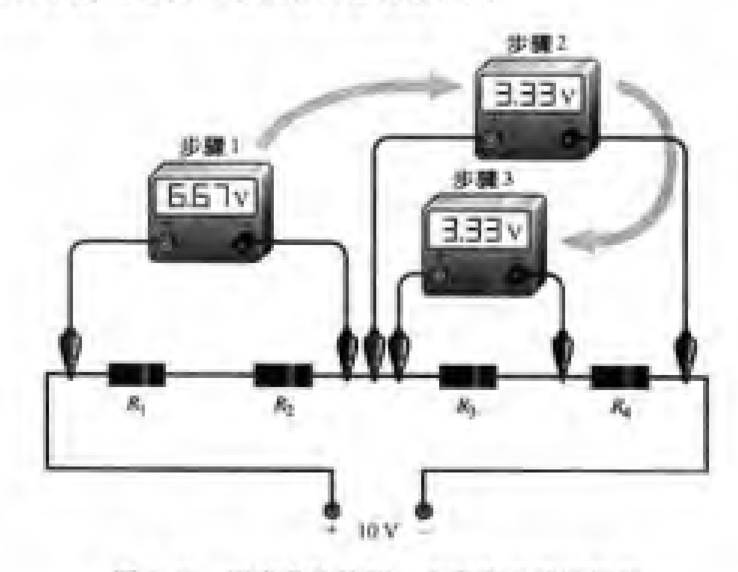


图5.65 用半分法检测一个串联电路的短路

5.10节练习

1. 短路的定义。
2. 开路的定义。
3. 如果一个串联电路开路，会出现什么情况？
4. 实际电路中开路，会产生哪两个结果？什么会导致电路短路的发生？
5. 一个电阻损坏后一般会开路。(对或错)
6. 通过一个串联电阻电路的总电压是24 V。若有一个电阻开路，分布在该电阻之上的电压是多少？每个未损坏的电阻上分布的电压是多少？

技术实践

有一块可以进行修改的分压器电路板，可以用来评测技术实践。连接一个有 6.5 Ah 额定值的 12 V 电池组，提供 5 个不同的电压值。该分压器在模数转换器中可以给一个电路提供正参考电压。我们在这里所需要做的是检查电路，看提供的是否是在相对于电池组的负极误差在 ±5% 允许范围内的电压：10.4 V，8.0 V，7.3 V，6.0 V 和 2.7 V。如果实际电路并未提供这些指定电压，可以经过修改实现。必须确保电阻的额定功率适用于实际应用，并且判断连接分压器的电池组可以用多长时间。

电路的原理图

- 利用图 5.66 求电阻值，并画出分压器电路的原理图以便了解工作原理。板上的所有电阻都是 1/4 W。

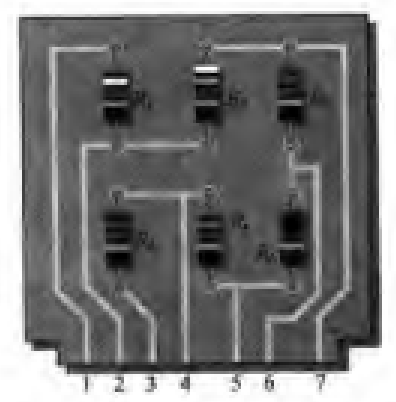


图 5.66 可修改的分压器电路板

电压

- 引线 3 连接到 12 V 电池组的正极，引线 1 连接到负极，求电路板上每根引线相对于电池组负极的电压值。比较实际电压值和以下给定值：

  引线 1:12 V 电池组的负极接线柱
  引线 2:2.7 V ± 5%
  引线 3:12 V 电池组的正极接线柱
  引线 4:10.4 V ± 5%
  引线 5:8.0 V ± 5%
  引线 6:7.3 V ± 5%
  引线 7:6.0 V ± 5%

- 如果实际电路的输出电压和上述说明的规定值不一样，对电路进行一些必要的修改以符合说明。画出修改后的电路原理图，标上电阻值和适当的额定功率。

电池组

- 连入分压器电路后，12 V 的电池组提供的总电流是多少？6.5 Ah 的电池组能用几天？

检验过程

- 如何验证分压器电路板，需要使用什么设备？详述检验过程的每个步骤。

故障检修

- 判断以下各种情况中可能出现的错误。其中电压是相对于电池组负端(电路板上的引线 1)的。

  1. 电路板上任一引线均无电压
  2. 引线 3 和引线 4 是 12 V，其他均是 0 V
  3. 引线 1 是 0 V，其他是 12 V
  4. 引线 6 是 12 V，引线 7 是 0 V
  5. 引线 2 是 3.3 V

技术实践练习

1. 如图 5.66 所示，接入一个 12 V 的电池组，分压器电路消耗的总功率是多少？
2. 如果引线 3 接到 6 V 电池组的正极接线柱，引线 1 接到负极接线柱，分压器的输出电压是多少？
3. 若分压器电路板连入提供一个正参考电压的电子电路，那么分压器电路板上的哪根引线应该接到该电子电路的接地端？

小结

- 串联电路中所有节点的电流一致。
- 串联电路的串联总电阻等于所有电阻的总和。
- 串联电路中任意两点之间的总电阻等于该两点间所有串联电阻之和。
- 若串联电路中的所有电阻阻值相同，总电阻等于一个电阻的阻值和电阻个数的乘积。
- 串联的电压源电压值可代数相加。
- 基尔霍夫电压定律：单一闭合回路的电路中，电压降的总和等于这个回路中电源的总电压；一个闭合回路内，所有电压(包括电源和电压降)的代数和为零。
- 电路中的电压降对总电源电压的极性总是相对的。
- 习惯上，电流从电源的正极流出，从负极流入。
- 习惯上，电流从每个电阻的正极流入，从负极(较低的正极)流出。
- 电流流经一个电阻时，能级的降低产生电压降。
- 分压器是电阻串联排列而成的。
- 分压器名称的由来是，串联电路中分布在任意电阻上的电压降，是由总电压根据该电阻值相对于总电阻的比例值来分配的。
- 电位器可作为可调分压器使用。
- 一个电阻电路的总功率是串联电路中所有电阻各自功率的总和。
- 参考地的电压是0 V，电路中所有点的电压都是相对它而言的。
- 串联电路中开路端的电压等于电源电压。
- 串联电路中短路端的电压等于0 V。

主要术语

电路接地：一种接地方法，将金属底座印刷电路板上的组件或很大的可导面积作为公共点或参考点，也称底座接地。

基尔霍夫电压定律：定律表述为(1)单一闭合回路的电路中，电压降的总和等于这个回路中电源的总电压；(2)一个闭合回路内，所有电压(包括电源和电压降)的代数和为零。

开路：电流通路断开的电路状态。

串联：电路中，两点之间各元件的连接构成单一电流通路的元件关系。

短路：两点之间是零阻抗或异常低阻抗的电路状态，通常是可以忽略的情况。

分压器：由串联电阻构成，可得到一个或多个电压输出的电路。

公式

5.1	$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$	n个电阻串联的总电阻
5.2	$R_T = nR$	n个等阻值电阻串联的总电阻
5.3	$V_S = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n$	基尔霍夫电压定律
5.4	$V_S - V_1 - V_2 - V_3 - \cdots - V_n = 0$	基尔霍夫电压定律的另一种表述
5.5	$V_x = \left(\frac{R_x}{R_T}\right) V_S$	分压器的公式
5.6	$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n$	总功率

自测题

1. 已知五个等阻值电阻串联，流入第一个电阻的电流是2 A，那么从第二个电阻流出的电流值是：
   (a) 等于2 A　　(b) 小于2 A　　(c) 大于2 A

2. 四个电阻串联的电路中，为了测量从第三个电阻流出的电流，安培表应置于：
   (a) 第三个和第四个电阻之间 (b) 第二个和第三个电阻之间
   (c) 电源的正极 (d) 电路中的任意点
3. 当第三个等值电阻串联入两个串联等值电阻中，总电阻：
   (a) 保持一致 (b) 增加 (c) 减小 (d) 增加三分之一
4. 已知四个等值电阻串联的电路中，移开一个电阻后重连电路，电流：
   (a) 通过被移开电阻的电流值减小
   (b) 减小四分之一
   (c) 四倍
   (d) 增加
5. 已知三个阻值为 110 Ω，220 Ω 和 330 Ω 的电阻串联，则总电阻为：
   (a) 小于 100 Ω (b) 三个阻值的平均值 (c) 550 Ω (d) 650 Ω
6. 一个 9 V 的电池组连接到一个串联电阻电路中，阻值分别是 68 Ω，33 Ω，100 Ω 和 47 Ω，则电流是多少？
   (a) 36.3 mA (b) 27.6 A (c) 22.3 mA (d) 363 mA
7. 把四节 1.5 V 电池装进手电筒，其中有一节装反了，那么分布在灯泡上的电压是多少？
   (a) 6 V (b) 3 V (c) 4.5 V (d) 0 V
8. 将串联电路中所有的电压降和电源的电压相加，考虑极性关系，得到的结果等于：
   (a) 电源电压 (b) 总电压降 (c) 0 (d) 电源电压和总电压降的和
9. 串联电路中有六个电阻，且每个电阻上的电压降都是 5 V，则电源电压是：
   (a) 5 V (b) 30 V (c) 取决于电阻值 (d) 取决于电流
10. 串联电路中的电阻分别是 4.7 kΩ，5.6 kΩ 和 10 kΩ，分布电压最大的电阻是：
   (a) 4.7 kΩ 的电阻 (b) 5.6 kΩ 的电阻 (c) 10 kΩ 的电阻 (d) 难以判断
11. 电源电压是 100 V，以下哪种串联部分消耗的功率最大？
   (a) 一个 100 Ω 的电阻 (b) 两个 100 Ω 的电阻 (c) 三个 100 Ω 的电阻 (d) 四个 100 Ω 的电阻
12. 由五个等值电阻串联构成的一个电路的总功率是 10 W，则每个电阻的功率是多少？
   (a) 10 W (b) 50 W (c) 5 W (d) 2 W
13. 串联电阻电路连接上一个安培表，打开电源后表头读数是 0，那么应该检查：
   (a) 导线断开 (b) 电阻短路 (c) 电阻开路 (d) (a)和(c)
14. 检查一个串联电阻电路，发现电流比正常值大，那么应该检查：
   (a) 电路开路 (b) 电路短路 (c) 电阻值变小 (d) (b)和(c)

故障检修测验

参考图 5.70

1. 图 5.70 所示的电路中有一个毫安表的读数增大，那么另外两个的电流读数将：
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
2. 如果电源电压减小，那么每个毫安表的电流读数将：
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
3. 如果用一个不同阻值的电阻替换 R_1，通过 R_1 的电流变大，那么每个毫安表的电流读数将：
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

参考图 5.73

4. A，B 两点之间连接一个 10 V 的电源电压。如果开关从位置 1 掷向位置 2，则电源流出的电流将：
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
5. 条件同第 4 题，则通过 R_3 的电流将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

6. 如果开关在位置 1，R_3 短路，则通过 R_2 的电流将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

7. 如果开关在位置 2，R_3 短路，则通过 R_5 的电流将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

参考图 5.77

8. 如果开关从位置 *A* 掷向位置 *B*，则安培表的读数将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

9. 如果开关从位置 *B* 掷向位置 *C*，则 R_4 的电压将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

10. 如果开关从位置 *C* 掷向位置 *D*，则 R_1 的电流将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

参考图 5.84(b)

11. 如果 R_1 变为 1.2 kΩ，则从点 *A* 到点 *B* 的电压将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

12. 如果 R_2 和 R_3 互换，则从点 *A* 到点 *B* 的电压将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

13. 如果电源电压从 8 V 增加到 10 V，则从点 *A* 到点 *B* 的电压将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

参考图 5.90

14. 如果 9 V 的电源电压减少到 5 V，则电路的电流将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

15. 如果 9 V 的电源电压反向，则点 *B* 的对地电压将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

习题（较难的题目标有星号，奇数编号题目的答案在本书的最后）

5.1 节　串联电阻

1. 连接图 5.67 中的各组电阻，使之在点 *A* 和点 *B* 之间串联。

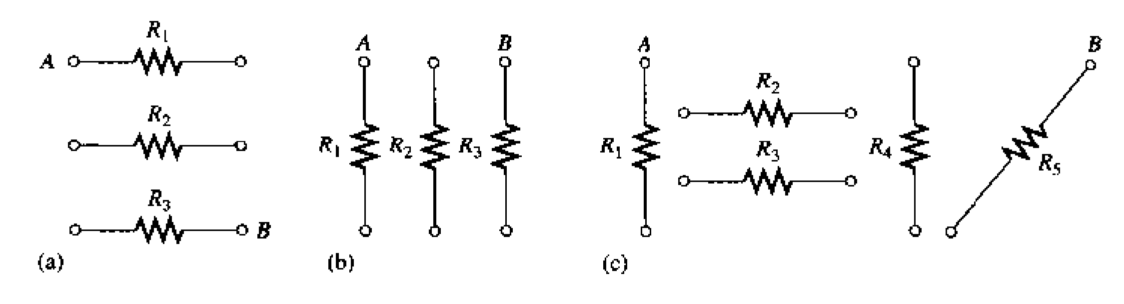


图 5.67

2. 判断图 5.68 中哪些电阻串联，将各根引线相连，使所有的电阻串联。

3. 从图 5.69 所示的双面 PC 板上，区分各组串联电阻。注意，很多连接是下面连通的。

5.2 节　串联电路中的电流

4. 若串联电路中的总电压是 12 V，总电阻是 120 Ω，则流过每个电阻的电流是多少？

5. 如图 5.70 所示，从电源流出的电流是 5 mA，那么从电路中每个毫安表读出的电流是多少？

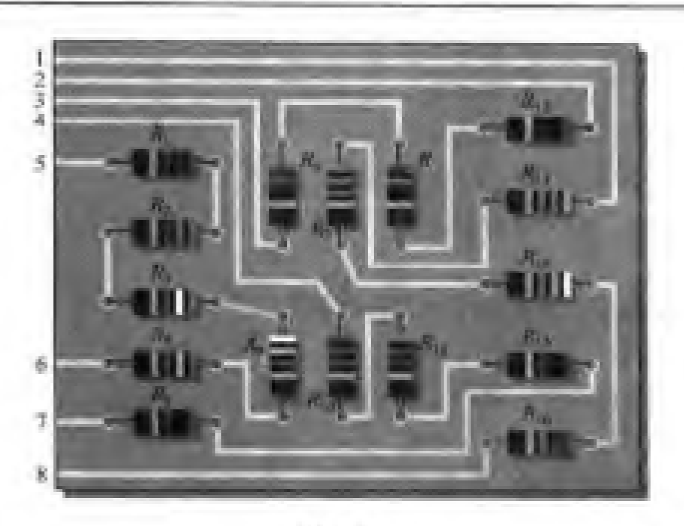


图 5.68

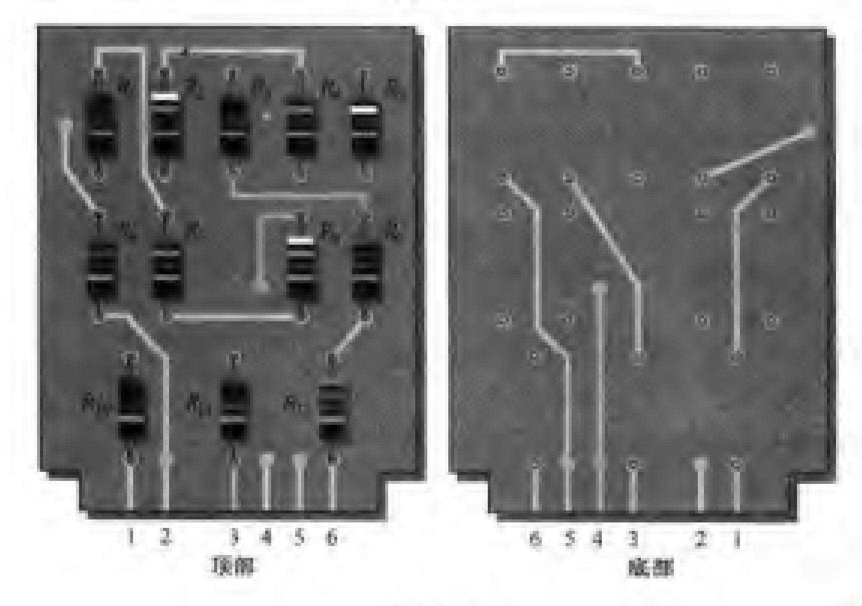


图 5.69

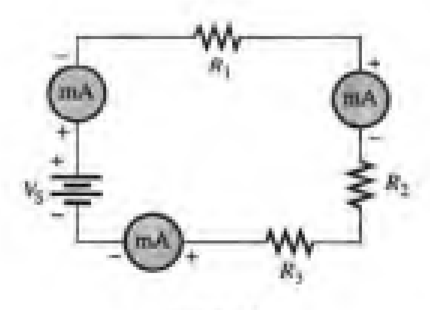


图 5.70

6. 如图 5.68 所示的 PC 板上，为了测量 R_1 的电流，画出电源和毫安表的连接。这一步可以测量其他哪一个电阻的电流?

*7. 利用 1.5 V 的电池组，一个开关和三个灯泡设计一个电路，分别提供 4.5 V 给一个，两个或三个灯泡，只使用一个单端控制开关，画出原理图。

5.3 串联电路的总电阻

8. 一个串联电路的电阻阻值(每种一个)分别是 1.0 Ω，2.2 Ω，5.6 Ω，12 Ω 和 22 Ω，总电阻是多少?

9. 以下各组电阻串联,求各组的总电阻。

(a) 560 Ω 和 1000 Ω　　(b) 47 Ω 和 56 Ω

(c) 1.5 kΩ,2.2 kΩ 和 10 kΩ　　(d) 1.0 MΩ,470 kΩ,1.0 kΩ 和 2.2 MΩ

10. 求图5.71中各个电路的总电阻。

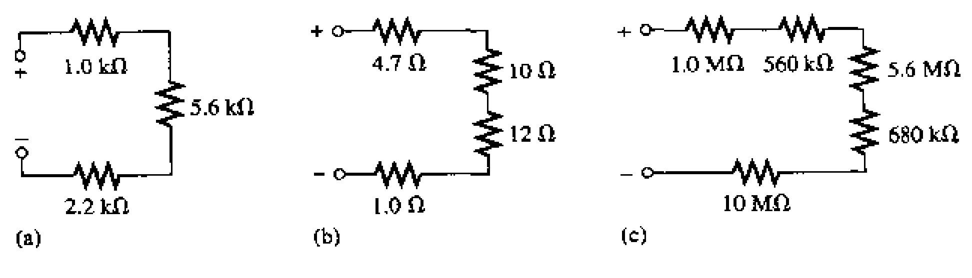


图5.71

11. 已知12个5.6 kΩ的电阻串联,总电阻是多少?

12. 6个56 Ω,8个100 Ω和2个22 Ω的电阻串联,总电阻是多少?

13. 电路如图5.72所示,总电阻是17.4 kΩ,则 R_5 的阻值是多少?

*14. 已知实验室可用的电阻阻值如下:10 Ω,100 Ω,470 Ω,560 Ω,680 Ω,1.0 kΩ,2.2 kΩ 和 5.6 kΩ,数量不限,其他阻值暂缺。有一个项目需要一个18 kΩ的电阻,如何利用现有阻值的这些电阻串联得到该总电阻?

15. 电路如图5.71所示,3个电路串联,总电阻是多少?

16. 电路如图5.73所示,开关在各个位置时,从点 A 到点 B 的总电阻是多少?

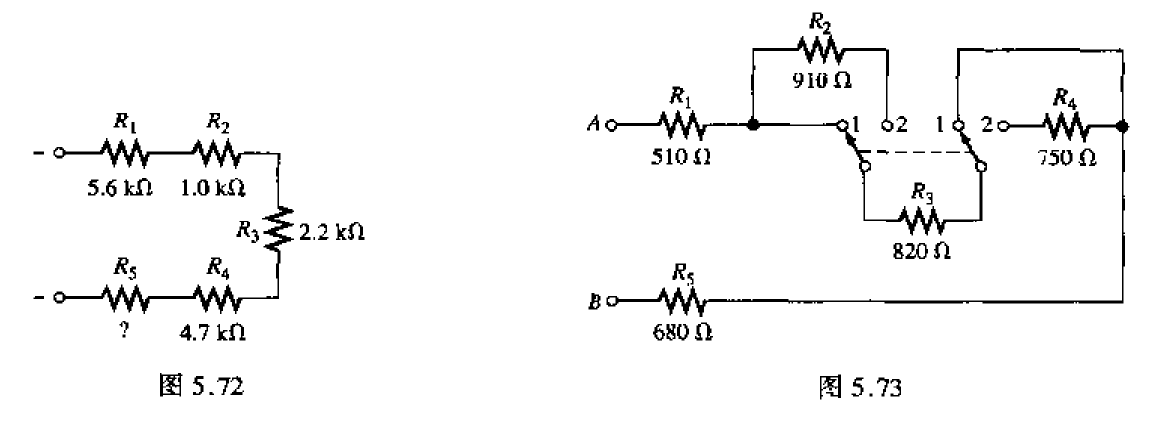


图5.72　　图5.73

5.4节 串联电路中的欧姆定律

17. 电路如图5.74所示,每个电路的电流是多少?

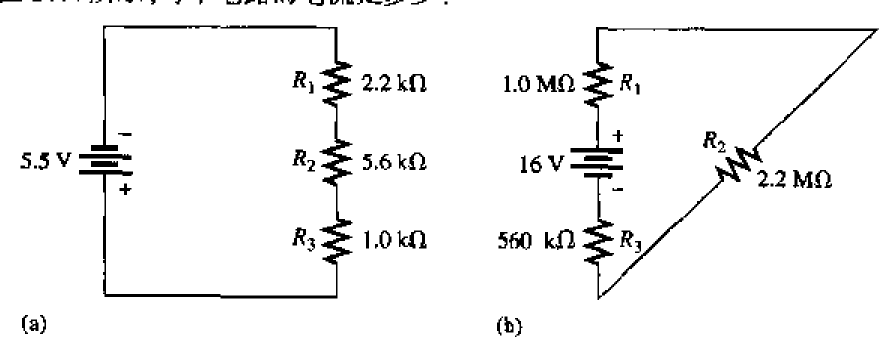


图5.74

18. 电路如图5.74所示,求通过每个电阻的电压降是多少?

19. 已知电源电压是 500 V 的电路中，3 个 470 Ω 的电阻串联，电路中的电流是多少？
20. 一个 5 V 的电池组和 4 个等阻值电阻串联，已知电流是 2.23 mA，则每个电阻的阻值是多少？
21. 电路如图 5.75 所示，每个电阻的阻值是多少？
22. 给出图 5.76 所示电路中 V_{R1}，R_2 和 R_3 的值。

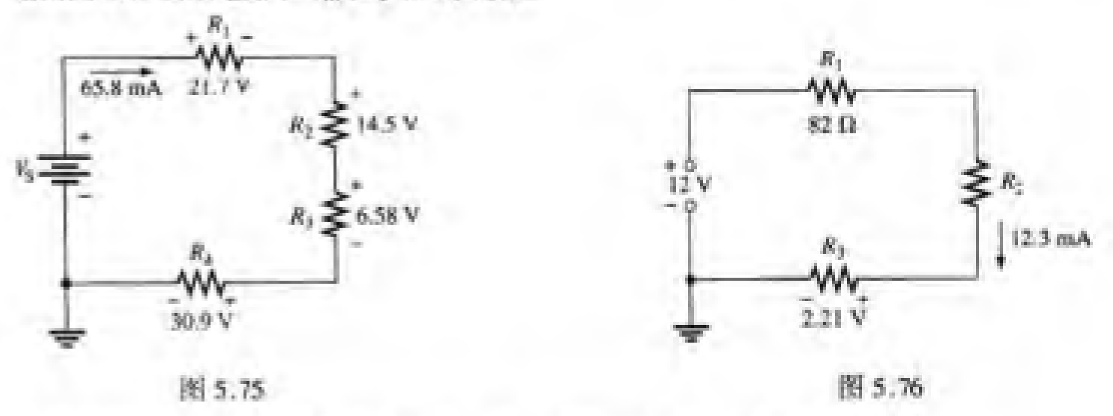


图 5.75　　　　图 5.76

23. 电路如图 5.77 所示，开关拨在不同位置时，安培表测得的电流各是多少？
24. 电路如图 5.78 所示，双刀双掷的开关拨在不同位置时，安培表测得的电流各是多少？

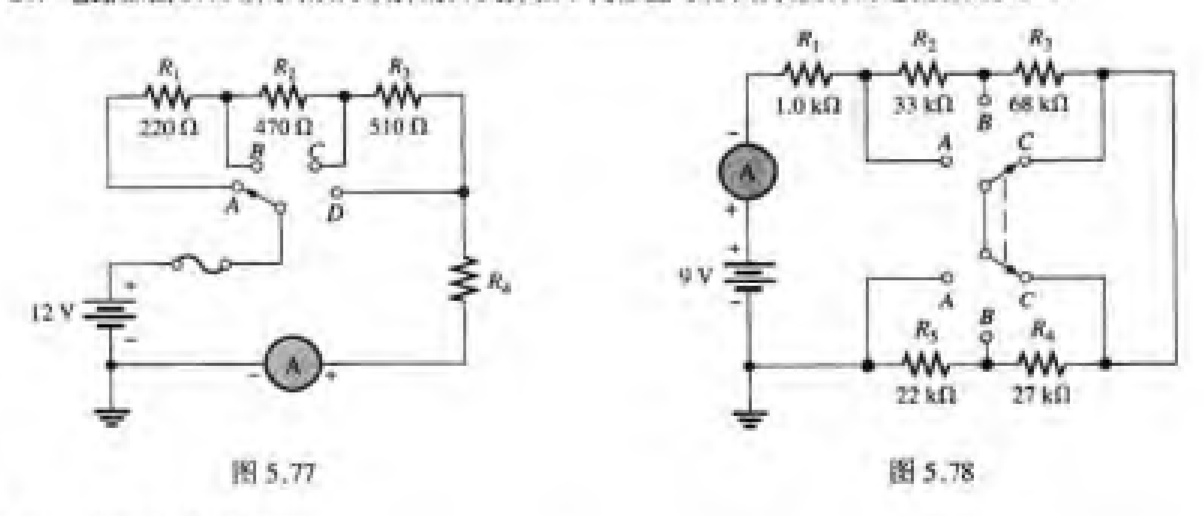


图 5.77　　　　图 5.78

5.5 节　串联的电压源

25. 串联相加是用来描述电源同向串联的。已知一个 5 V 和一个 9 V 的电源同向串联，总电压是多少？
26. 串联相消是用来描述电源反向串联的。已知一个 12 V 和一个 3 V 的电池组反向串联，总电压是多少？
27. 电路如图 5.79 所示，求各组电路的总电源电压。

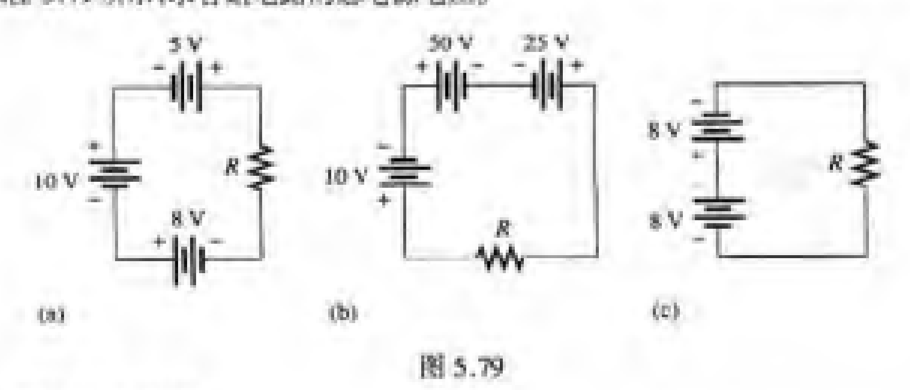


图 5.79

5.6 节　基尔霍夫电压定律

28. 已知 3 个串联电阻的电压降分别是 5.5 V，8.2 V 和 12.3 V，则串联这些电阻的电源电压是多少？

29. 一个 20 V 的电源和 5 个电阻串联，已知其中 4 个电阻的电压降分别是 1.5 V，5.5 V，3 V 和 6 V，则第 5 个电阻上的电压是多少？

30. 电路如图 5.80 所示，求各个电路中未标识的电压降是多少？画出测量每个未知电压降的电压表的连接。

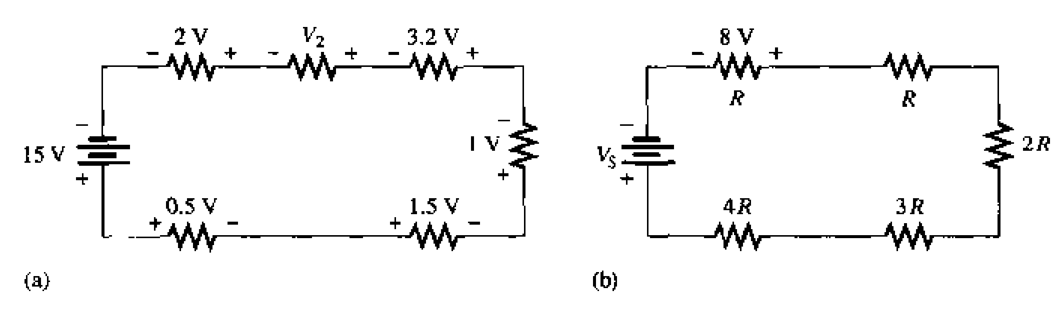


图 5.80

31. 电路如图 5.81 所示，求 R_4 的电阻是多少？

32. 电路如图 5.82 所示，求 R_1，R_2 和 R_3 的电阻是多少？

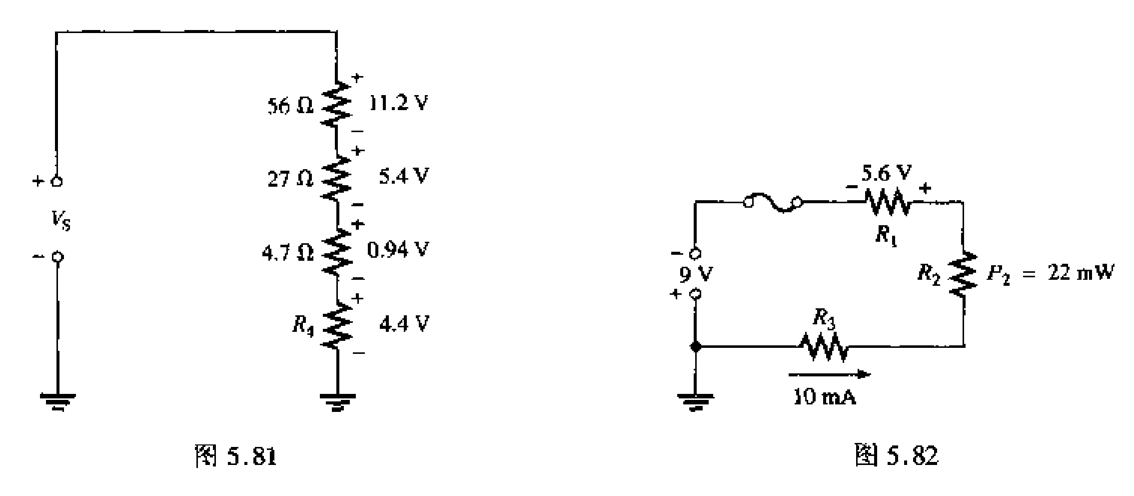


图 5.81　　图 5.82

33. 如图 5.83 所示，求开关掷在不同位置上时 R_5 上的电压是多少？已知在不同位置上的电流是：A，3.35 mA；B，3.73 mA；C，4.50 mA；D，6.00 mA。

34. 利用习题 33 的结果，求图 5.83 中开关掷在不同位置上时各个电阻上的电压是多少？

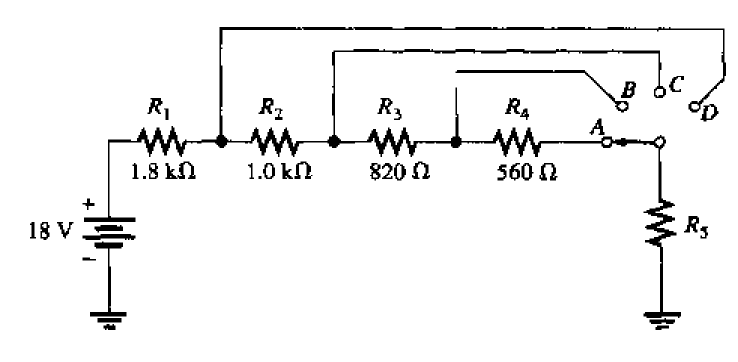


图 5.83

5.7 节　分压器

*35. 已知电路的总电阻是 560 Ω，则一个 27 Ω 电阻上的电压占总电压的百分比是多少？

36. 电路如图 5.84 所示，每个分压器中点 A 到点 B 的电压是多少？

*37. 电路如图 5.85 所示，每个电阻上的电压是多少？R 是单元值电阻，其他所标示的都是该阻值的倍数。

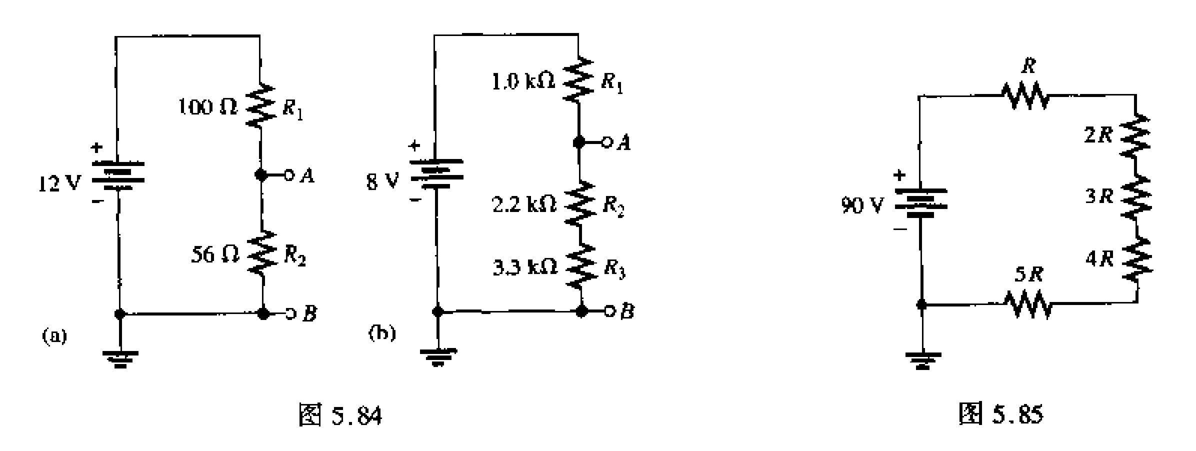


图 5.84　　　　图 5.85

38. 电路如图 5.86 所示,求相对于电池组的负极而言,每个点的电压是多少?

39. 电路如图 5.87 所示,已知 R_1 上的电压是 10 V,其他电阻上的电压是多少?

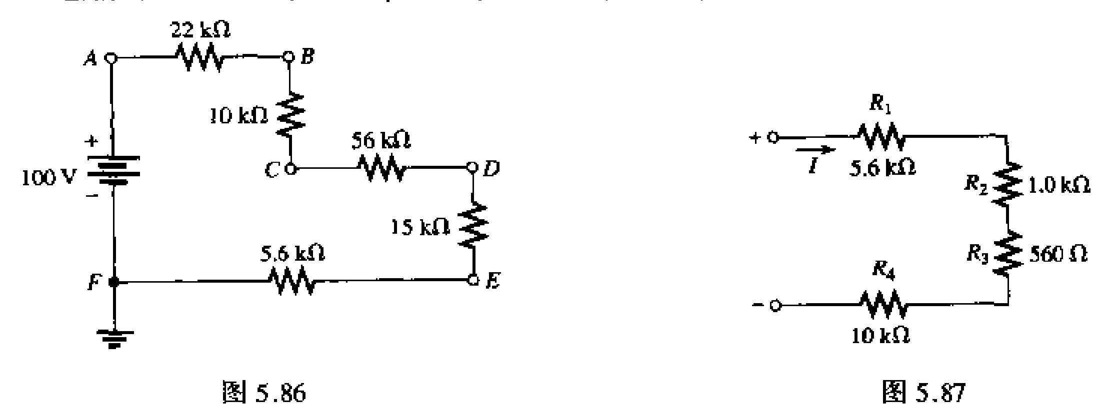


图 5.86　　　　图 5.87

*40. 利用附录 A 中的标准电阻阻值表设计一个分压器。利用一个对地电压为 30 V 的电压源,要求提供的电压近似等于 8.18 V,14.7 V 和 24.6 V,电源的电流不超过 1 mA。画出电路的连接情况和电阻位置的原理图,标示出电阻的个数、阻值和额定功率。

*41. 利用一个 120 V 的电源,设计一个可变的分压器,输出的电压值可从最小值 10 V 调节到最大值 100 V,误差在 ±1% 内。电位器的最大电阻值处对应着最大的电压值,最小电阻值(0)处对应着最小的电压值,最大电流可以达到 10 mA。

5.8 节　串联电路中的功率

42. 已知 5 个电阻串联,每个电阻消耗的功率是 50 mW,总功率是多少?

43. 利用习题 39 的结果,求图 5.87 所示电路中的总功率是多少?

44. 已知 4 个 1/4 W 的电阻串联,阻值如下:1.2 kΩ,2.2 kΩ,3.9 kΩ 和 5.6 kΩ。不超过额定功率时,串联电阻上的最大电压是多少? 如果超过最大电压,哪一个电阻将最先烧毁?

45. 电路如图 5.88 所示,总电阻是多少?

46. 已知一个串联电路中,有一个 1/8 W,一个 1/4 W 和一个 1/2 W 的电阻,总电阻是 2400 Ω。若电路中的每个电阻都消耗最大的功率,求以下值:



(a) I　　(b) V_T　　(c) 每个电阻的阻值

图 5.88

5.9 节　电路接地

47. 电路如图 5.89 所示,求每个点的对地电压是多少?

48. 电路如图 5.90 所示,不用电压表直接连接电阻,如何测量通过 R_2 的电压?

49. 电路如图 5.90 所示,求每个点的对地电压是多少?

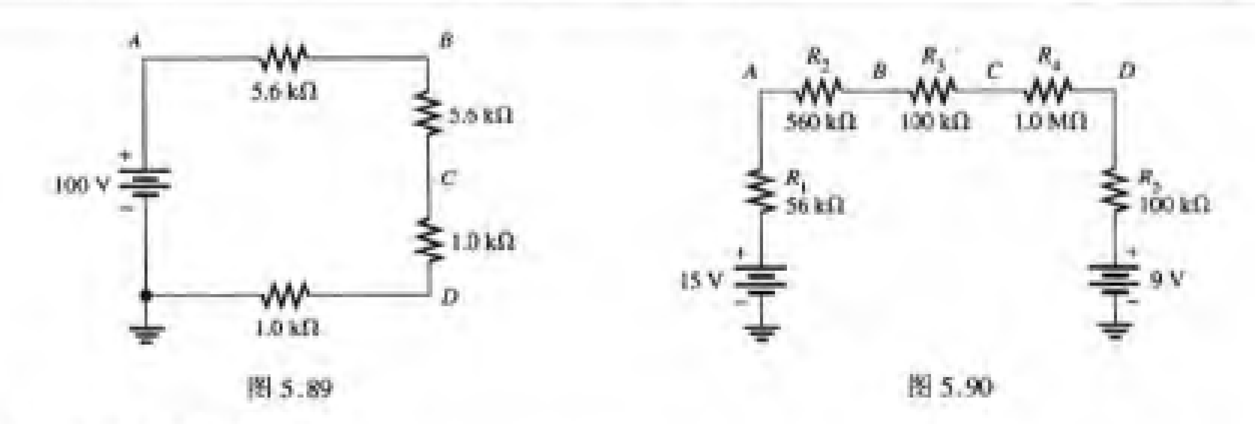


图 5.89　　　　图 5.90

5.10 节　故障检修

50. 已知 5 个电阻串联在一个 12 V 电池组提供电压的电路中。测量得到除 R_2 以外的电阻电压都是 0 V，电路哪里有故障？R_2 上的电压是多少？

51. 如图 5.91 中的仪表所示，判断电路故障是哪一种类型，并找出是哪个部分出现了故障？

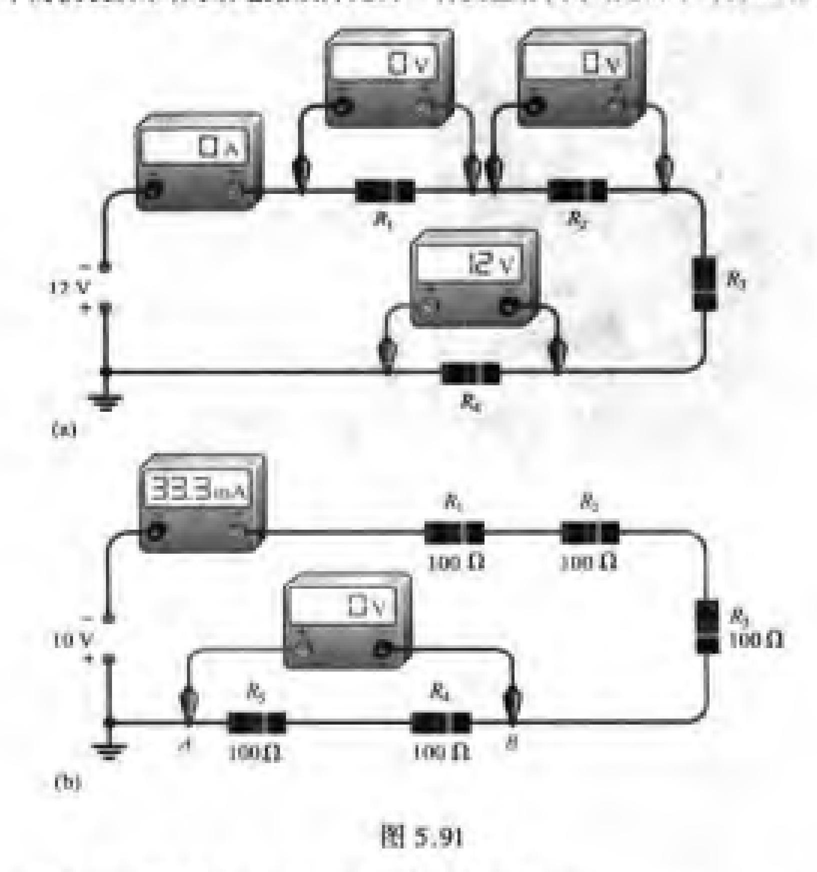


图 5.91

52. 如图 5.91(b)所示，如果只有 R_2 短路，测得的电流是多少？

* 53. 表 5.1 列出了图 5.92 中 PC 板上的电阻测量值，这些结果是否正确？如果不正确，试分析可能的原因。

* 54. 如图 5.92 所示的 PC 板上，测得引线 5 和引线 6 之间的电阻是 15 kΩ，这是否说明有故障？如果有，试分析其原因。

* 55. 如图 5.92 所示的 PC 板上，测得引线 1 和引线 2 之间的电阻是 17.83 kΩ，引线 2 和引线 4 之间是 13.6 kΩ，这是否说明有故障？如果有，试分析其原因。

* 56. 如图 5.92 所示的 PC 板上，把引线 2 连到引线 4，将引线 3 连到引线 5。使三组串联电阻互相连接构成单一串联电路，引线 1 和引线 6 之间串联一个电源电压和一个安培表。若增加电源电压，可以看到电流相应地增加。突然，电流变为零，并且闻到冒烟的味道。所有的电阻都是 1/2 W。

(a)发生了什么情况?

(b)如何解决这个问题?

(c)电压多大时,会发生这种情况?

表 5.1 图 5.92 中 PC 板上的电阻测量值

两端引脚	阻值	两端引脚	阻值
1 和 2	∞	2 和 6	∞
1 和 3	∞	3 和 4	∞
1 和 4	4.23 kΩ	3 和 5	∞
1 和 5	∞	3 和 6	∞
1 和 6	∞	4 和 5	∞
2 和 3	23.6 kΩ	4 和 6	∞
2 和 4	∞	5 和 6	19.9 kΩ
2 和 5	∞		

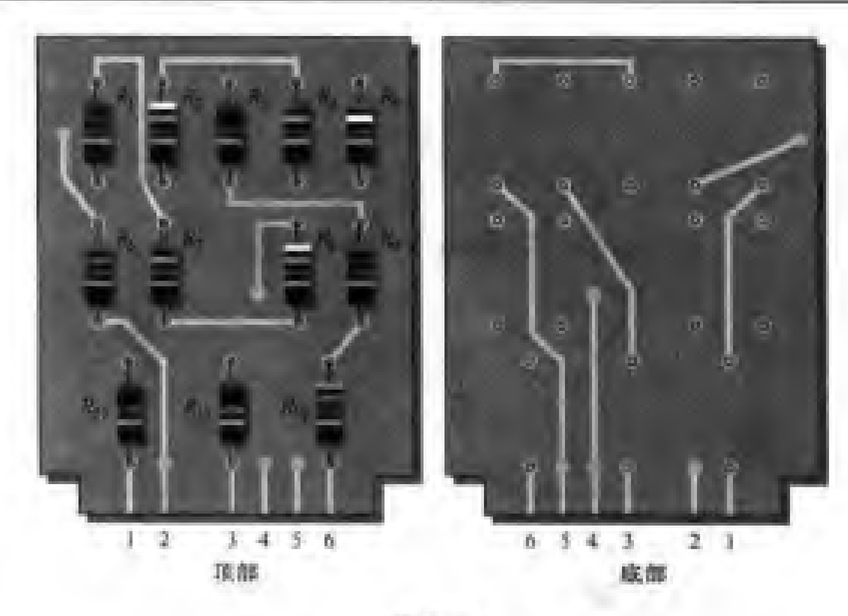


图 5.92

EWB/Multisim 故障检修

以下问题要使用本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

57. 打开文件 P05.57,测量串联总电阻。
58. 打开文件 P05.58,通过测量判断是否有一个电阻开路。如果是,是哪一个电阻?
59. 打开文件 P05.59,求未标识的电阻值。
60. 打开文件 P05.60,求未标识的电压值。
61. 打开文件 P05.61,如果有短路电阻,找到该电阻。

答案

5.1 节 串联电阻

1. 串联电路是将给定电阻首尾相连串行连接起来的电路。
2. 串联电路中只有一条单一的电流通路。
3. 参见图 5.93。

4. 参见图5.94。

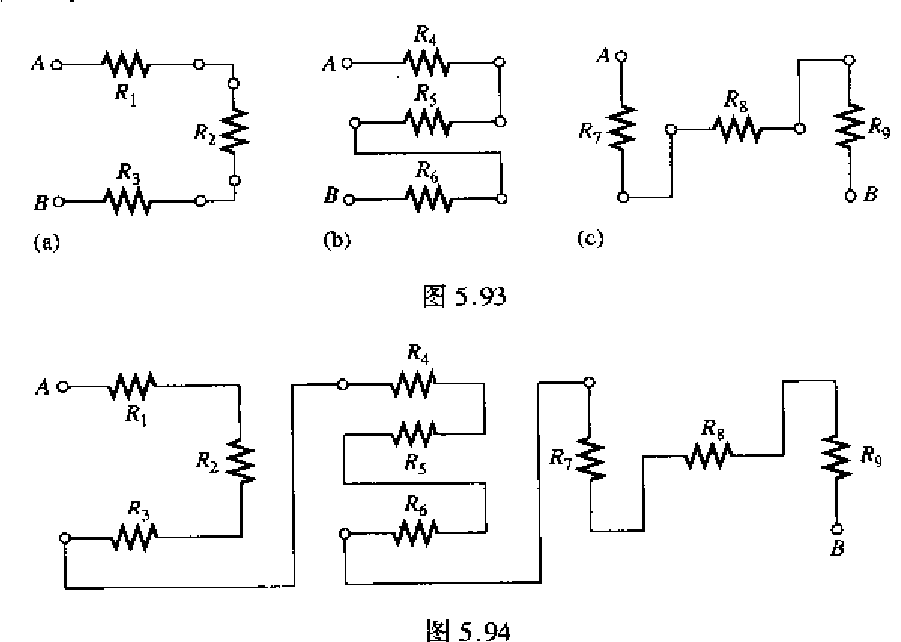


图5.93

图5.94

5.2节　串联电路中的电流

1. $I = 1\ \text{A}$
2. 毫安表测得点 C 和点 D 之间为 50 mA,点 E 和点 F 之间为 50 mA。
3. $I = 100\ \text{V}/56\ \Omega = 1.79\ \text{A}$;1.79 A
4. 串联电路中,所有点上的电流都一样。

5.3节　串联电路的总电阻

1. $R_T = 1.0\ \Omega + 2.2\ \Omega + 3.3\ \Omega + 4.7\ \Omega = 11.2\ \Omega$
2. $R_T = 100\ \Omega + 2(56\ \Omega) + 4(12\ \Omega) + 330\ \Omega = 590\ \Omega$
3. $R_T = 13.8\ \text{k}\Omega - (1.0\ \text{k}\Omega + 2.7\ \text{k}\Omega + 5.6\ \text{k}\Omega + 560\ \Omega) = 3.9\ \text{k}\Omega$
4. $R_T = 12(56\ \Omega) = 672\ \Omega$
5. $R_T = 20(5.6\ \text{k}\Omega) + 30(8.2\ \text{k}\Omega) = 358\ \text{k}\Omega$

5.4节　串联电路中的欧姆定律

1. $I = 10\ \text{V}/300\ \Omega = 33.3\ \text{mA}$
2. $V_S = (5\ \text{A})(21.2\ \Omega) = 106\ \text{V}$
3. $V_1 = (5\ \text{A})(10\ \Omega) = 50\ \text{V}$; $V_2 = (5\ \text{A})(5.6\ \Omega) = 28\ \text{V}$; $V_3 = (5\ \text{A})(5.6\ \Omega) = 28\ \text{V}$
4. $R = (\frac{1}{4})(5\ \text{V}/4.63\ \text{mA}) = 270\ \Omega$

5.5节　串联的电压源

1. $V_T = 4(1.5\ \text{V}) = 6.0\ \text{V}$
2. 60 V/12 V = 5,参见图5.95。

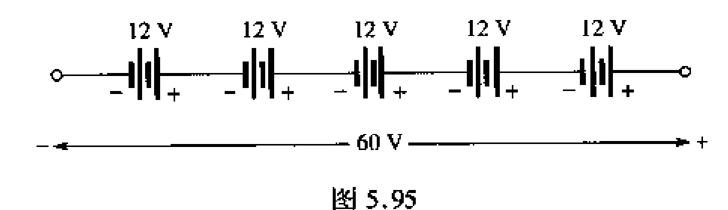


图5.95

3. 参见图 5.96。
4. (a) $V_{S(tot)} = 100\ V + 50\ V - 75\ V = 75\ V$ (b) $V_{S(tot)} = 20\ V + 10\ V - 10\ V - 5\ V = 15\ V$
5. 参见图 5.97。

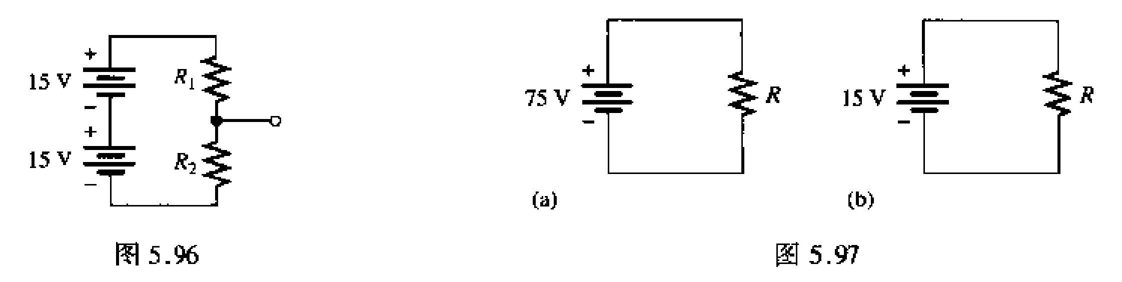


图 5.96 图 5.97

5.6 节 基尔霍夫电压定律

1. (a)基尔霍夫定律规定通过一个闭合通路的总电压是零。
   (b)基尔霍夫定律规定总压降之和等于总电源电压。
2. $V_T = V_S = 50\ V$
3. $V_1 = V_2 = 5\ V$
4. $V_3 = 25\ V - 10\ V - 5\ V = 10\ V$
5. $V_S = 1\ V + 3\ V + 5\ V + 8\ V + 7\ V = 24\ V$

5.7 节 分压器

1. 分压器由两个或多个电阻串联的电路构成，任一电阻或电阻组合两端的电压和该电阻阻值是成正比的。
2. 两个或多个电阻可以构成一个分压器。
3. $V_X = (R_x/R_T)V_S$
4. $V_R = 10\ V/2 = 5\ V$
5. $V_{47} = (47\ \Omega/129\ \Omega)100\ V = 36.4\ V$; $V_{82} = (82\ \Omega/129\ \Omega)100\ V = 63.6\ V$；参见图 5.98。
6. 把触点放在中间点处。

图 5.98

5.8 节 串联电路中的功率

1. 各个电阻的功率相加得到总功率。
2. $P_T = 2\ W + 5\ W + 1\ W + 8\ W = 16\ W$
3. $P_T = (1\ A)^2(1110\ \Omega) = 1110\ W$

5.9 节 电路接地

1. 电路中的公共参考点是地。
2. 对
3. 对
4. 参见图 5.99。

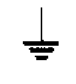


图 5.99

5.10 节 故障检修

1. 短路是一条旁路部分电路的零电阻通路。
2. 开路是电流通路的断路。
3. 若电路开路，则没有电流。
4. 开关或损坏的部分都会造成开路。开关、导线不当连接或溅落的焊锡都会造成短路。

5. 对，损坏的电阻通常会开路。
6. 开路 R 上的电压是 24 V；其他 R 上的电压是 0 V。

技术实践

1. $P_T = (12\ \text{V})^2/16.6\ \text{k}\Omega = 8.67\ \text{mW}$
2. 引线 2：1.41 V；引线 6：3.65 V；引线 5：4.01 V；引线 4：5.20 V；引线 7：3.11 V
3. 引线 3 接地。

实例相关练习

5.1 (a)参见图 5.100。
(b)$R_1 = 1.0\ \text{k}\Omega$，$R_2 = 33\ \text{k}\Omega$，$R_3 = 39\ \text{k}\Omega$，$R_4 = 470\ \Omega$，$R_5 = 22\ \text{k}\Omega$

图 5.100

5.2 板上的所有电阻串联。
5.3 258 Ω
5.4 12.1 kΩ
5.5 6.8 kΩ
5.6 4440 Ω
5.7 114 mA
5.8 7.8 V
5.9 $V_1 = 1\ \text{V}$，$V_2 = 3.3\ \text{V}$，$V_3 = 2.2\ \text{V}$，$V_5 = 6.5\ \text{V}$，$V_{S(min)} = 32.5\ \text{V}$
5.10 使用欧姆表。
5.11 12 V
5.12 2 V
5.13 10 V 和 20 V
5.14 47 V
5.15 593 Ω。很可能是 560 Ω 的电阻，因为 593 Ω 在 560 Ω 的标准允许范围（±10%）内。
5.16 $V_1 = 3.57\ \text{V}$；$V_2 = 6.43\ \text{V}$
5.17 $V_1 = V_2 = V_3 = 33.3\ \text{V}$
5.18 $V_{AB} = 4\text{V}$；$V_{AC} = 36.8\ \text{V}$；$V_{BC} = 32.8\ \text{V}$；$V_{BD} = 46\ \text{V}$；$V_{CD} = 13.2\ \text{V}$
5.19 8.49 W
5.20 $P_1 = 0.92\ \text{W}(1\ \text{W})$；$P_2 = 2.49\ \text{W}(5\ \text{W})$；$P_3 = 0.838\ \text{W}(1\ \text{W})$；$P_4 = 3.04\ \text{W}(5\ \text{W})$
5.21 $V_A = 0\ \text{V}$；$V_B = -25\ \text{V}$；$V_C = -50\ \text{V}$；$V_D = -75\ \text{V}$；$V_E = -100\ \text{V}$
5.22 3.33 V

自测题

1.(a) 2.(d) 3.(b) 4.(d) 5.(d) 6.(a) 7.(b)
8.(c) 9.(b) 10.(c) 11.(a) 12.(d) 13.(d) 14.(d)

故障检修测验

1.(a) 2.(b) 3.(a) 4.(b) 5.(b) 6.(c) 7.(a) 8.(a)
9.(a) 10.(b) 11.(b) 12.(c) 13.(a) 14.(a) 15.(b)

第6章 并联电路

引言

在第5章中我们已经介绍了串联电路、欧姆定律和基尔霍夫电压定律的应用，同时介绍了在一个单电源电路中，串联电路如何当做一个分压器使用以获得多个特定电压。

在本章中，读者将学到欧姆定律在并联电路中的应用和基尔霍夫电流定律。本章还将举例说明几个并联电路的应用，包括自动照明设备、家居配线和模拟电表的内部配线。

电阻并联连接时，电压应用于并联电路，每个电阻提供独立的电流通路。并联的电阻越多，并联电路的总电阻就越小。

本章目标

- 识别并联电路
- 确定加在每个并联支路上的电压
- 基尔霍夫电流定律的应用
- 确定并联总电阻
- 欧姆定律的应用
- 确定并联电流源的作用
- 利用并联电路作为分流器
- 确定并联电路的功率
- 描述几个并联电路的基本应用
- 并联电路的故障检修

主要术语

- 支路
- 并联
- 基尔霍夫电流定律
- 节点
- 分流器

技术实践

在技术实践中，我们假设读者作为一家电子设备公司的员工，第一份工作是分析各种在日常检修中发现故障的仪器。在这项特殊的任务中，你必须确定一个损坏的五量程毫安表的故障，并进行修复。本章所要求掌握的并联电路和基本安培表的知识，将使你加深对欧姆定律和分流器的理解，并充分应用电阻的色环编码。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http//www.prenhall.com/floyd。

6.1 并联的电阻

两个或两个以上的电阻各自连接在两个相同的节点上，则称它们是互相并联的。并联电路提供一个以上的电流通路。

学完本节后读者应该能够：

- 识别并联电路
- 将一个并联电阻的物理模型图转换成原理图

每一条电流通路称为一个支路，一个并联电路有一个以上的支路。两个电阻的并联连接在图 6.1(a)中。在图 6.1(b)中，电源流出的电流在节点 A 处分开了，一部分通过 R_1，另一部分通过 R_2。如果并联更多的电阻，则点 A 和点 B 之间有更多的电流通路，如图 6.1(c)所示。在电路中，沿着顶部的所有点和点 A 一样，沿着底部的所有点和点 B 一样。

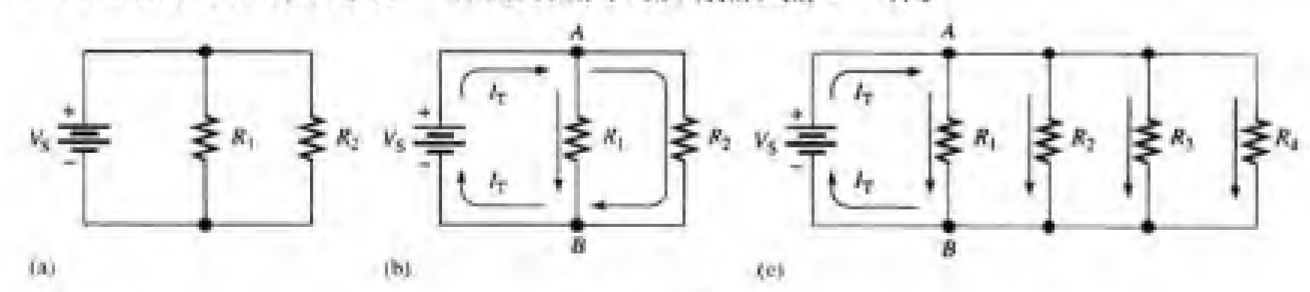


图 6.1　并联电阻

6.1.1　识别并联电路

如图 6.1 所示，很显然电阻是并联的。但在实际电路图中，并联关系并不很清晰。无论电路图如何绘制，识别并联电路是很重要的。

识别并联电路的原则如下：

如果两个独立的节点之间有一条以上的电路通路(支路)，且两点之间的电压通过每个支路，则此两点之间是并联电路。

如图 6.2 所示，注意两个独立的节点 A 和节点 B 之间各种并联电阻的不同画法。需要注意的是，在每种画法中，电流从点 A 可以通过两路到达点 B，而且分布在每个支路上的电压相同。尽管图 6.2 中显示的只有两个并联通路，但并联时可有任意个电阻。

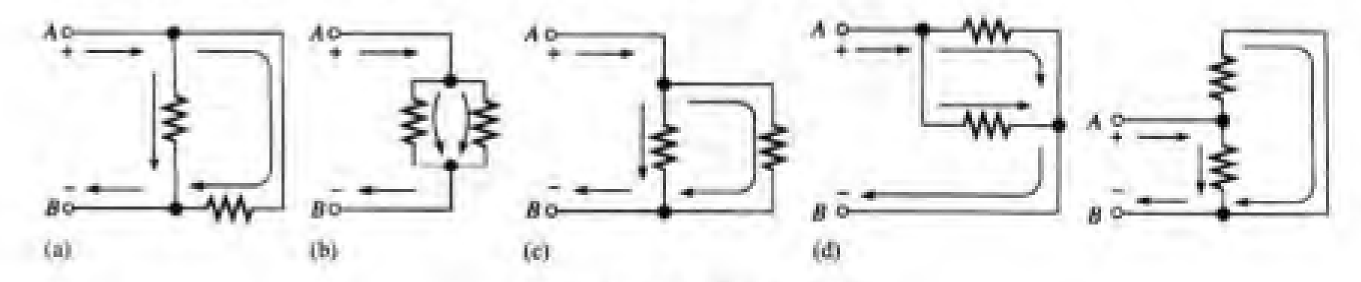


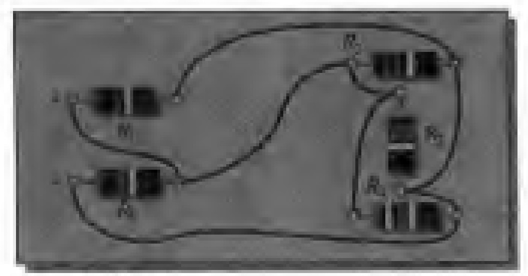
图 6.2　有两条并联通路的电路

例 6.1　如图 6.3 所示，假设电路板上排列了 5 个电阻。连接所有的电阻使之并联，注意要从正极到负极。画出原理图，并标注出每个电阻的阻值。

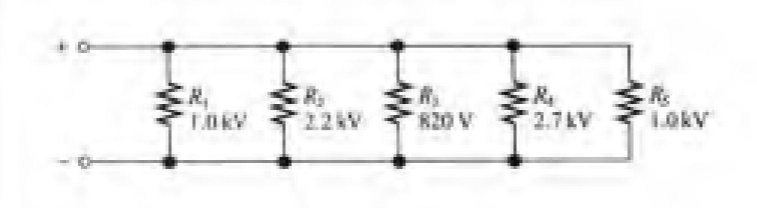


图 6.3

解:元件连线图如图 6.4(a)所示,原理图如图 6.4(b)所示。还要注意原理图不必像元件连线图那样画出实际的物理排列,原理图表示的只是各部分的电路连接。



(a) 元件连线图



(b) 原理图

图 6.4

练习:如果 R_2 被移开,如何重画电路图?

例 6.2 已知电路如图 6.5 所示,求并联组及其各电阻的阻值。

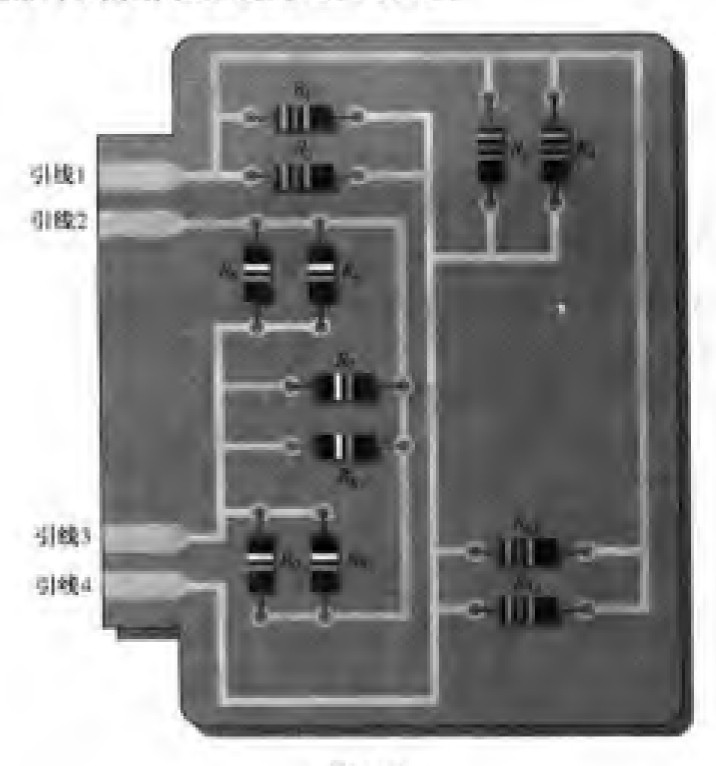


图 6.5

解:在引线 1 和引线 4 之间,电阻 R_1、R_4、R_{11} 和 R_{12} 并联,每个电阻的阻值是 56 kΩ。在引线 2 和引线 3 之间,电阻 R_5 和 R_{10} 并联,每个电阻的阻值是 100 kΩ。

练习:图 6.5 中,如何将所有的电阻并联?

6.1 节练习

1. 并联电路中的电阻如何连接?
2. 如何识别并联电路?
3. 如图 6.6 所示,完成各部分电路的原理图,使点 A 到点 B 之间的电阻并联。
4. 如图 6.6 所示,把各组电路连接起来,使各个电阻互相并联。

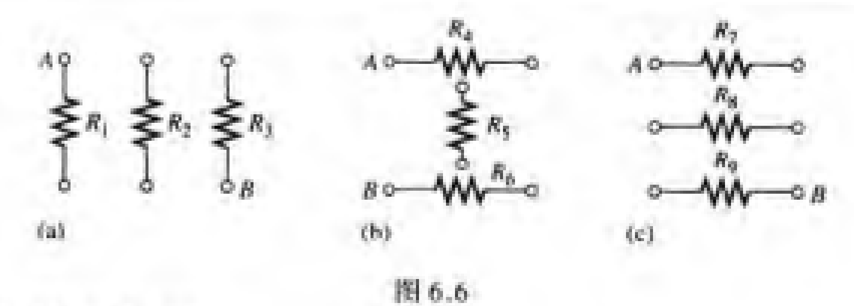


图 6.6

6.2 并联电路的电压

如上一节所述，并联电路中的每一个电流通路称为一个支路。一个并联电路中，分布在任意给定支路上的电压等于分布在并联电路中其他支路上的电压。

学完本节后读者应该能够：

- 确定分布在并联支路上的电压
- 解释为什么分布在所有并联电阻上的电压相同

图 6.7(a)用来说明一个并联电路中的电压。并联电路中，左侧的点 A、点 B、点 C 和点 D 是电位一致的点，而且组成了一个节点。可以把这些点看成是从电池组的负极引出，由一根线连接的。右侧来自另一个节点的点 E、点 F、点 G 和点 H 的电压都等于电源的正极。因此，加在每个电阻上的电压是一样的，都等于电源电压。

图 6.7(b)中是和图 6.7(a)一样的电路，画法略微有些不同。其中，每个电阻的左侧都连接到电池组的负极这个独立的点上，每个电阻的右侧都连接到电池组的正极这个独立的点上，电阻通过电源依然都互相并联。

如图 6.8 所示，一个 12 V 的电池组连接 3 个并联电阻。若测量每个流经电池和电阻的电压，读数都是一致的。所以，并联电路中流经每个分支的电压是一样的。

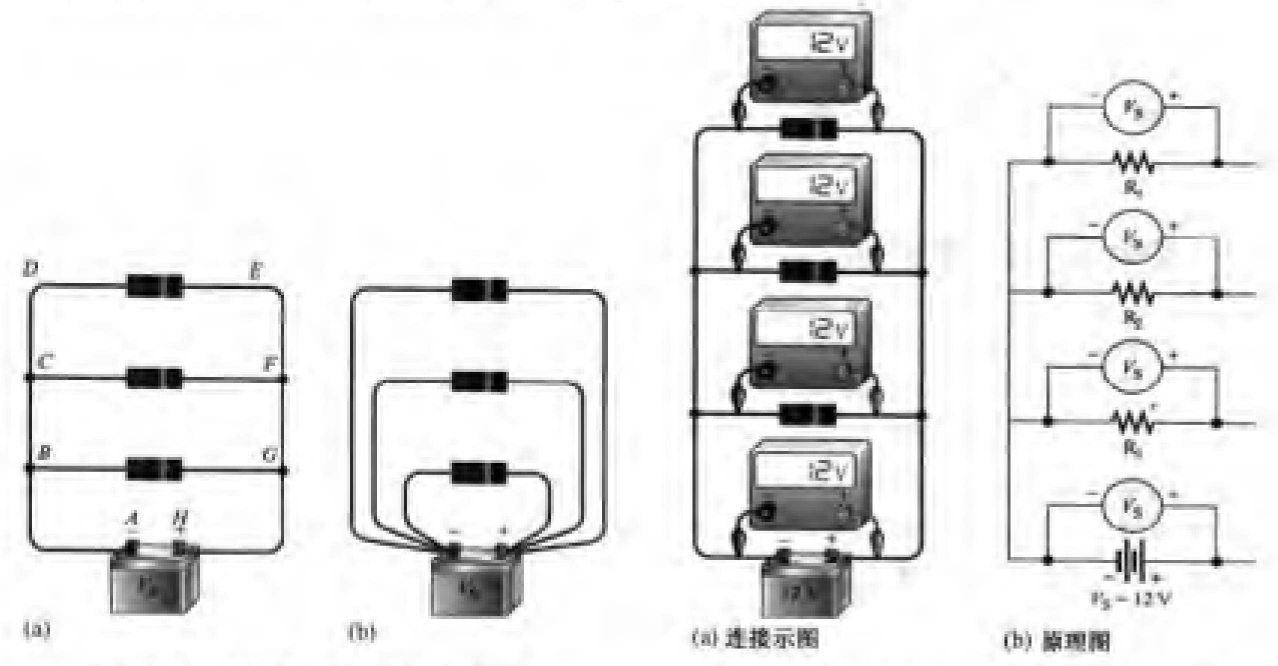


图 6.7 分布在并联支路上的电压一样

图 6.8 分布在每个并联电阻上的电压一样

例 6.3 如图 6.9 所示，求每个电阻的电压值是多少？

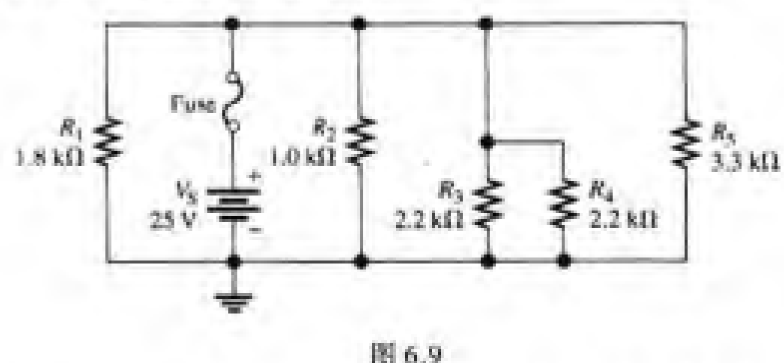


图 6.9

解：这 5 个电阻是并联的，所以，每个电阻两端的电压等效于施加一个电源电压。保险丝上没有电压，则通过每个电阻的电压为：

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = V_S = 25\ \mathrm{V}$$

练习：若 R_4 被移开，R_3 的电压是多少？

6.2 节练习

1. 已知一个 10 Ω 和一个 22 Ω 的电阻并联在一个 5 V 的电源上，求每个电阻上的电压是多少？
2. 如图 6.10 所示，一个电压表连接在 R_1 处，且读数是 118 V。若移动电压表并联到 R_2 处，则电压表的读数是多少？电压源的读数是多少？
3. 已知电路如图 6.11 所示，那么电压表 1 的读数是多少？电压表 2 的读数是多少？
4. 在并联电路中，每个支路的电压关系如何？

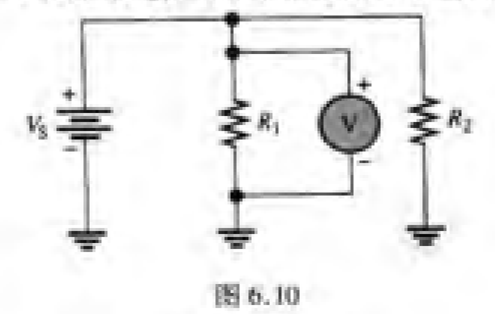


图 6.10

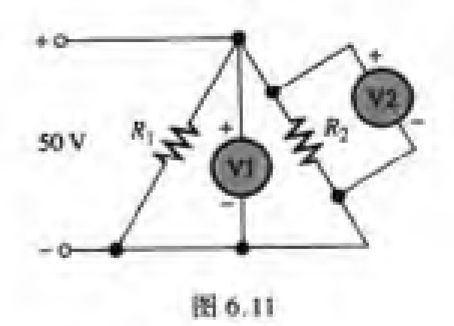


图 6.11

6.3 基尔霍夫电流定律

在上一章中，我们已经介绍了基尔霍夫电压定律，用于说明闭合串联电路中的电压。这里将介绍基尔霍夫电流定律，用于说明并联电路中的电流。

学完本节后读者应该能够：

- 应用基尔霍夫电流定律
- 表述基尔霍夫电流定律
- 通过支路电流的相加确定总电流
- 确定未知支路的电流

基尔霍夫电流定律通常简写为 KCL(Kirchhoff's current law)，表述如下：

流进一个节点的电流总和(流入总电流)等于流出该节点的电流总和(流出总电流)。

电路中任意一个节点是两个或两个以上部分的连接点。因此在并联电路中，任一节点是并联支路的集合点。例如图6.12中的点 A 是一个节点，点 B 是另一个节点。从电源的正极沿着电流方向，从电源出来的总电流 I_T 流进点 A 的节点。在该点上，电流如图所示分成三个支路，每个支路的电流（I_1，I_2 和 I_3）流出节点 A。根据基尔霍夫电流定律可得，流进节点 A 的总电流等于流出节点 A 的总电流，即为：

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

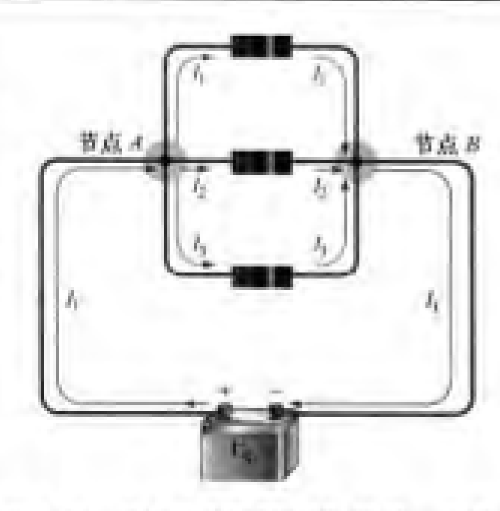


图6.12 基尔霍夫电流定律：流进一个节点的电流等于流出该节点的电流

接着图6.12中3个支路的电流又都流回节点 B。电流 I_1，I_2 和 I_3 流入节点 B，I_T 流出节点 B。因此，根据基尔霍夫定律公式，节点 B 和节点 A 一样：

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

6.3.1 基尔霍夫电流定律的一般公式

上述讨论用一个鲜明的例子来证明基尔霍夫电流定律。图6.13显示的是适用于一般电路的节点，电路中有很多个支路连接到这个点上。电流 $I_{IN(1)}$ 到电流 $I_{IN(n)}$（n 为任意数）流进节点，电流 $I_{OUT(1)}$ 到电流 $I_{OUT(m)}$（m 为任意数，可以不等于 n）流出节点。根据基尔霍夫电流定律，流进节点的电流总和必须等于流出节点的电流总和。根据图6.13，基尔霍夫电流定律的一般公式是：

$$I_{IN(1)} + I_{IN(2)} + \cdots + I_{IN(n)} = I_{OUT(1)} + I_{OUT(2)} + \cdots + I_{OUT(m)} \tag{6.1}$$

若式(6.1)中右边的所有项都移到左边，符号变为负号，同时右边剩下零，可得如下公式：

$$I_{IN(1)} + I_{IN(2)} + \cdots + I_{IN(n)} - I_{OUT(1)} - I_{OUT(2)} - \cdots - I_{OUT(m)} = 0$$

基尔霍夫电流定律同样也可以表述为：

流出和流进节点的所有支路电流的代数和为零。

可以连接一个回路，通过测量每一个支路电流和电源的总电流，来验证基尔霍夫电流定律，如图6.14所示。把各个支路的电流相加，其总和等于总的电流。这个定律适用于任意数目的支路。

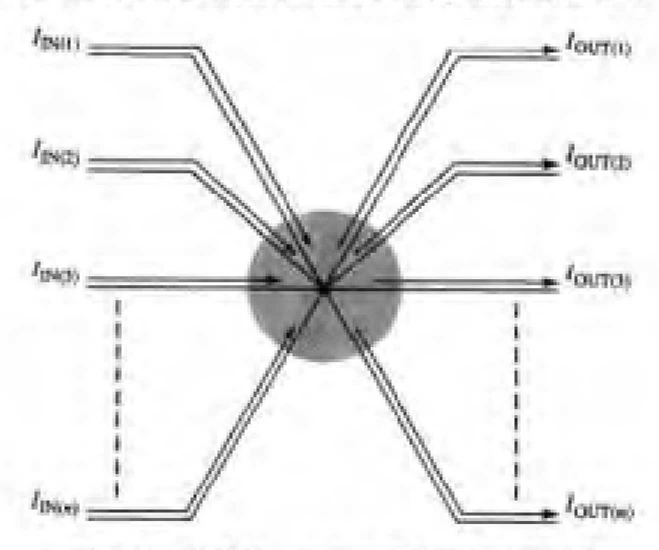


图6.13 电路任一节点的基尔霍夫电流定律

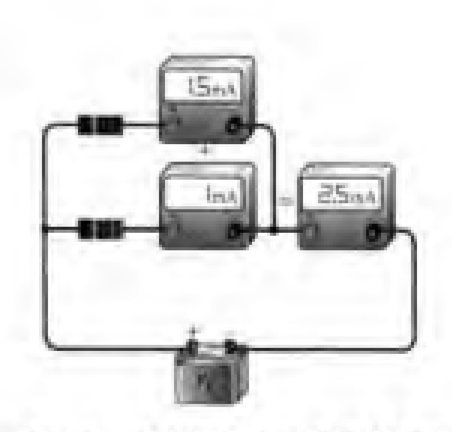


图6.14 基尔霍夫电流定律的验证

下面的三个例子用来说明基尔霍夫电流定律的应用。

例 6.4 如图 6.15 所示，已知各支路的电流值，求流入节点 A 的总电流值和流出节点 B 的总电流值是多少？

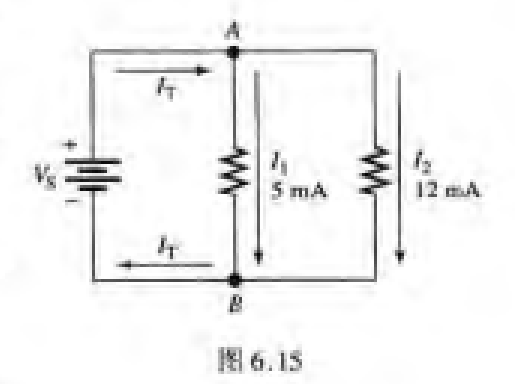


图 6.15

解：流出节点 A 的总电流是两个支路电流的和，因此流入节点 A 的电流值为：

$$I_T = I_1 + I_2 = 5\ \text{mA} + 12\ \text{mA} = \mathbf{17\ mA}$$

流入节点 B 的总电流是两个支路电流的和，因此流入节点 A 的电流值为：

$$I_T = I_1 + I_2 = 5\ \text{mA} + 12\ \text{mA} = \mathbf{17\ mA}$$

练习：如果在图 6.15 的电路中加入一个电流值为 3 mA 的支路，那么流入节点 A 和流出节点 B 的总电流值为多少？

例 6.5 如图 6.16 所示，求流过 R_2 的电流 I_2 是多少？

解：节点的总电流从 3 个支路流入：$I_T = I_1 + I_2 + I_3$。从图 6.16 可知，通过 R_1 和 R_3 可得到总电流和各个支路的电流，则通过下式得到 I_2：

$$I_2 = I_T - I_1 - I_3 = 100\ \text{mA} - 30\ \text{mA} - 20\ \text{mA} = \mathbf{50\ mA}$$

练习：如图 6.16 所示，如果加入一个电流为 12 mA 的第四支路，求电流 I_T 和 I_2 是多少？

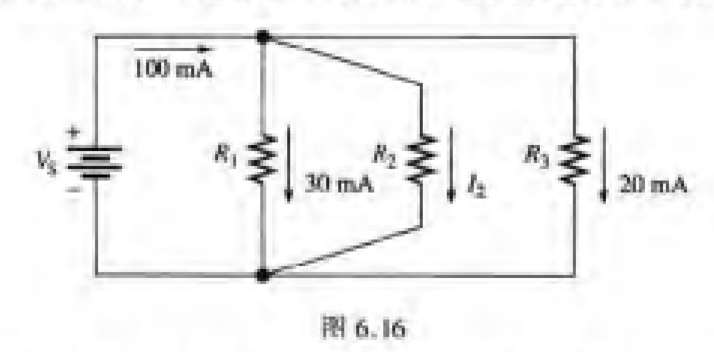


图 6.16

例 6.6 如图 6.17 所示，利用基尔霍夫电流定律，求流过电流表 A3 和 A5 的电流值各是多少？

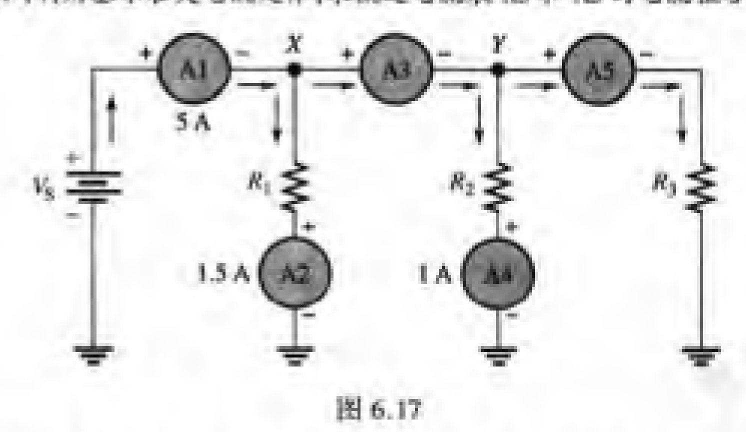


图 6.17

解：流入节点 X 的总电流是 5 A，流出节点 X 的两个电流分别为流过电阻 R_1 的 1.5 A 和流过电流表 A3 的电流。根据基尔霍夫电流定律，在节点 X 处有：

$$5\ \text{A} = 1.5\ \text{A} + I_{A3}$$

整理可得：

$$I_{A3} = 5\ \text{A} - 1.5\ \text{A} = \mathbf{3.5\ A}$$

流入节点 Y 的总电流 $I_{A3}=3.5$ A，流出节点 Y 的两个电流分别为流过电阻 R_2 的 1 A 和流过 A5 和 R_3 的电流。根据基尔霍夫电流定律，在节点 Y 处有：

$$3.5\ \text{A}=1\ \text{A}+I_{A5}$$

整理可得：

$$I_{A5}=3.5\ \text{A}-1\ \text{A}=\mathbf{2.5\ A}$$

练习：如果把一个电流表串联在 R_3 的下面，它的值会是多少？如果放在负极一端呢？

6.3 节练习

1. 用两种方法表述基尔霍夫电流定律。
2. 已知三个并联支路流入节点的总电流为 2.5 A，那么这三个支路电流的总和是多少？
3. 如图 6.18 中所示，两个支路电流 100 mA 和 300 mA 流入节点，求流出节点的电流是多少？
4. 如图 6.19 中所示，求电流 I_1 是多少？
5. 两个分路连到节点，同时两个支路电流流出这一节点。其中一个流入的支路电流为 1 A，一个流出的支路电流为 3 A，流入和流出该节点的总电流都是 8 A，求未知的流入和流出支路的电流分别为多少？

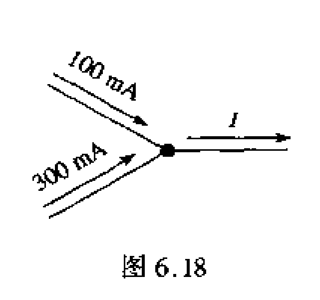


图 6.18

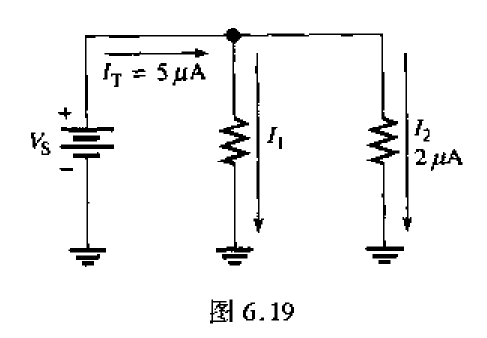


图 6.19

6.4 并联电路的总电阻

当两个电阻并联连接时，电路的总电阻会降低。并联电路中的总电阻总是低于并联支路中最小的电阻阻值。例如，如果一个 10 Ω 电阻和一个 100 Ω 电阻并联时，并联总电阻小于 10 Ω。

学完本节后读者应该能够：

- 确定并联总电阻
- 解释为什么并联会使总电阻降低
- 应用并联电阻公式

6.4.1 电流通路的数量对总电阻的影响

通常电阻并联连接时，电流会有一条以上的通路。电流通路的数目等于并联的支路数。

例如图 6.20(a)所示的是一个串联电路，所以只有一条电流通路，通过电阻 R_1 的电流 I_1 是一个定值。如果电阻 R_2 和电阻 R_1 并联，如图 6.20(b)所示，则会多出一条流过 R_2 的支路。电阻的并联使得从电流源流出的总电流增大。假设电源电压是一个常量，根据欧姆定律得出总电流增大意味着总电阻的减小。增加的并联电阻将使总电阻减小，同时总电流增大。

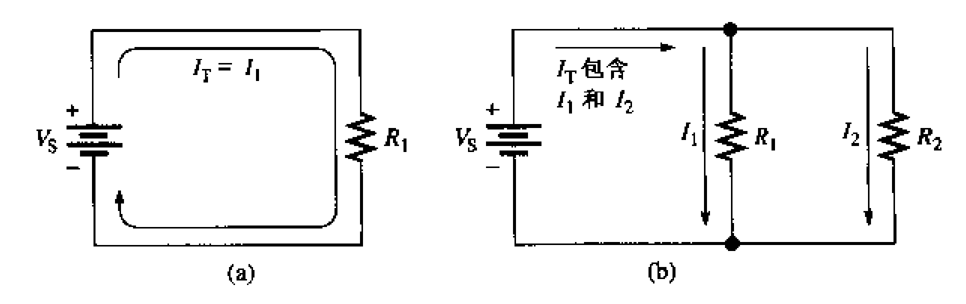


图 6.20 增加的并联电阻将使总电阻减小,同时总电流增大

6.4.2 并联总电阻的公式

图 6.21 所示的是一般情况下 n 个电阻并联连接的电路(n 可以是任意数)。根据基尔霍夫电流定律,电流公式为:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n$$

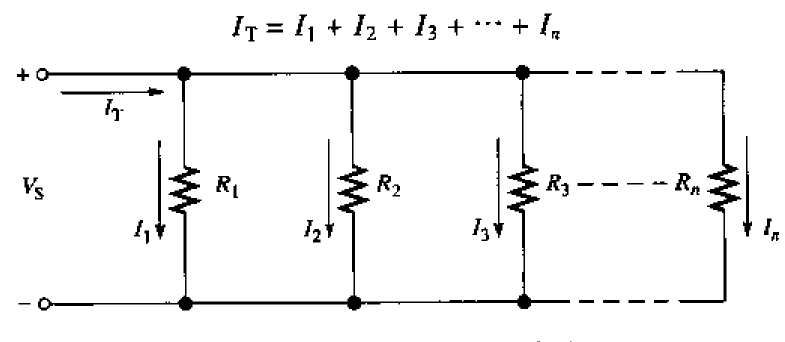


图 6.21 n 个电阻并联的电路

电压 V_S 通过每个并联电阻,根据欧姆定律,$I_1 = V_S/R_1$,$I_2 = V_S/R_2$,依次类推。代入电流公式,可得:

$$\frac{V_S}{R_T} = \frac{V_S}{R_1} + \frac{V_S}{R_2} + \frac{V_S}{R_3} + \cdots + \frac{V_S}{R_n}$$

等式右边的 V_S 项和左边的 V_S 项相消,只剩下电阻:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n} \tag{6.2}$$

定义电阻的倒数($1/R$)为电导,符号为 G,电导的单位是西门子(S),则式(6.2)可以用电导来表示:

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n \tag{6.3}$$

将式(6.2)中两边全部求倒数,可得 R_T:

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{R_n}\right)} \tag{6.4}$$

式(6.4)表明将所有的 $1/R$(或电导 G)项相加,然后将和求倒数,即可得到并联总电阻。例 6.7 介绍如何在特定情况下使用该公式,例 6.8 介绍如何使用计算器来求并联总电阻。

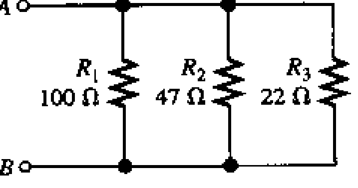


图 6.22

例 6.7 如图 6.22 所示,求点 A 和点 B 之间并联的总电阻是多少?

解: 已知每个电阻的阻值,可利用式(6.4)求并联总电阻。首先计算这 3 个电阻每一个阻值的倒数,即为电导:

$$G_1=\frac{1}{R_1}=\frac{1}{100\ \Omega}=10\ \text{mS}$$

$$G_2=\frac{1}{R_2}=\frac{1}{47\ \Omega}=21.3\ \text{mS}$$

$$G_3=\frac{1}{R_3}=\frac{1}{22\ \Omega}=45.5\ \text{mS}$$

接着,把 G_1,G_2 和 G_3 相加并求倒数,即为 R_T:

$$R_T=\frac{1}{10\ \text{mS}+21.3\ \text{mS}+45.5\ \text{mS}}=\frac{1}{76.8\ \text{mS}}=\mathbf{13.0\ \Omega}$$

可以注意到,R_T 的阻值(13.0 Ω)应该比并联电路中最小的电阻 R_3(22 Ω)的阻值还小。

练习:如果一个 33 Ω 的电阻并联到图 6.22 所示的电路中,那么新的总电阻 R_T 值为多少?

6.4.3 使用计算器解答

使用计算器,由并联电阻公式很容易计算得出例 6.7 的结果。一般的步骤是先通过输入 R_1 的值,再按下[2nd][x^{-1}],即可得到其倒数($1/R_1$)。(对于计算器来讲,求倒数并不是主要功能。)然后按下[+]键;再输入 R_2 得到其倒数。重复上面的步骤,直到所有的电阻值都输入进去,然后再按下[ENTER]键,最后按下[2nd][x^{-1}][ENTER],把 $1/R_T$ 变为 R_T,最终显示的即为并联总电阻的阻值。

例 6.8 使用 TI-86 型的计算器,计算例 6.7 中的总电阻。

解:**第一步**:输入 100,计算器显示 100;

第二步:按下[2nd][x^{-1}],计算器显示 100^{-1};

第三步:按下[+],显示 $100^{-1}+$;

第四步:输入 47,计算器显示 $100^{-1}+47$;

第五步:按下[2nd][x^{-1}],显示 $100^{-1}+47^{-1}$;

第六步:按下[+],显示 $100^{-1}+47^{-1}+$;

第七步:输入 22,显示 $100^{-1}+47^{-1}+22$;

第八步:按下[2nd][x^{-1}],显示 $100^{-1}+47^{-1}+22^{-1}$;

第九步:按下[ENTER],显示 76.7311411992E^{-3};

第十步:按下[2nd][x^{-1}],再按下[ENTER],显示结果 13.0325182758E0;

在第十步中,显示的数值就是总电阻,单位为欧姆,即总电阻是 **13.0 Ω**。

练习:如果例 6.7 的电路中再并联一个 33 Ω 的电阻,计算总电阻 R_T 应该增加哪几个步骤?

6.4.4 两个电阻并联的情况

式(6.4)是求总电阻时的一般性公式,可以计算任意数目的并联电阻。然而在实践中,更为实用的是考虑只有两个电阻的时候,因为电路中最常用的是两个电阻的并联。同样,任意数目的电阻并联可以分解为很多对两个电阻并联的情况,从而得到 R_T。在式(6.4)的基础上,两个电阻并联的总电阻公式可变为:

$$R_T=\frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right)+\left(\frac{1}{R_1}\right)}$$

化简分母各项:

$$R_T=\frac{1}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right)}$$

可以得到：

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{6.5}$$

式(6.5)的文字表述为：

两个电阻并联的总电阻等于两个电阻阻值的乘积除以两个电阻阻值相加的和。

例 6.9 说明了如何使用该式。

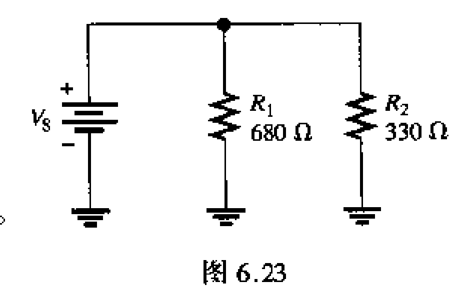


图 6.23

例 6.9 图 6.23 所示的电路中，求与电压源连接的总电阻是多少？

解：利用式(6.5)可得：

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(680\ \Omega)(330\ \Omega)}{680\ \Omega + 330\ \Omega} = \frac{224\ 400\ \Omega^2}{1010\ \Omega} = \mathbf{222\ \Omega}$$

练习：如图 6.23 所示，如果用一阻值为 220 Ω 的电阻代替 R_1，计算 R_T。

6.4.5 等阻值电阻并联的情况

在并联电路中，另一种特殊情况是许多阻值相同的电阻并联。这里有一种简捷的方法，来计算这种情况下的 R_T。

如果许多阻值相同的电阻并联，那么用符号 R 表示其电阻。例如：$R_1 = R_2 = R_3 = \cdots = R_n = R$。代入式(6.4)，可以得到一个求 R_T 的特殊公式：

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right) + \left(\frac{1}{R}\right) + \left(\frac{1}{R}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{R}\right)}$$

注意，分母中相同的项 $1/R$ 相加了 n 次（n 是相同阻值电阻的个数）。因此，该式可以写为：

$$R_T = \frac{1}{n/R}$$

或者：

$$R_T = \frac{R}{n} \tag{6.6}$$

式(6.6)中说明，当等阻值的电阻并联时，得到的总阻值 R_T 等于单个电阻阻值除以并联电阻的个数。例 6.10 解释了如何使用该式。

例 6.10 已知 4 个电阻为 8 Ω 的扬声器并联，作为放大器的输出端，扩音器输出端的总电阻值为多少？

解：4 个 8 Ω 电阻并联，利用式(6.6)可得：

$$R_T = \frac{R}{n} = \frac{8\ \Omega}{4} = \mathbf{2\ \Omega}$$

练习：如果去掉其中的两个扬声器，输出端的总阻值为多少？

6.4.6 确定未知电阻的并联情况

很多时候，在给定总阻值的情况下，可计算每个电阻的阻值。例如：两个电阻并联，已知总电阻。如果其中的一个电阻阻值为已知或任意值，则另外一个电阻的阻值可以用计算并联电路的式(6.5)计算。计算未知电阻 R_x 的公式可以如下表示：

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_x}$$

$$\frac{1}{R_x}=\frac{1}{R_T}+\frac{1}{R_A}$$

$$\frac{1}{R_x}=\frac{R_A-R_T}{R_AR_T}$$

$$R_x=\frac{R_AR_T}{R_A-R_T} \tag{6.7}$$

其中，R_x 为未知电阻，R_A 为已知或选定阻值的电阻。例 6.11 是此式的应用。

例 6.11　假设通过并联电路，想得到一个接近 150 Ω 的总电阻，已知其中一个电阻的阻值为 330 Ω，那么另外一个电阻的阻值应该是多少？

解：已知 $R_T = 150\ \Omega$，$R_A = 330\ \Omega$，因此：

$$R_x=\frac{R_AR_T}{R_A-R_T}=\frac{(300\ \Omega)(150\ \Omega)}{330\ \Omega-150\ \Omega}=275\ \Omega$$

最接近的阻值为 **270 Ω**。

练习：如果想得到一个总电阻为 130 Ω 的电路，并已知其中两个电阻的阻值分别为 330 Ω 和 270 Ω，那么第三个电阻的阻值应为多少？首先计算出阻值为 330 Ω 和 270 Ω 的电阻并联阻值，并把它当成一个电阻对待。

6.4.7　并联电阻的符号

很多情况下，为了简便，并联的符号表示为两条平行竖线。例如，R_1 和 R_2 并联，可表示为 $R_1 \| R_2$。几个电阻互相并联时，同样可以使用该符号。例如，

$$R_1 \| R_2 \| R_3 \| R_4 \| R_5$$

表示从 R_1 到 R_5 都是并联连接。

该符号同样可以应用于电阻阻值，例如，

$$10\ \text{k}\Omega \| 5\ \text{k}\Omega$$

表示一个 10 kΩ 电阻和一个 5 kΩ 电阻并联。

6.4 节练习

1. 并联的电阻越多，总电阻值是降低还是增加？
2. 总电阻值总是低于________________。
3. 写出任意个电阻并联的一般公式。
4. 写出两个电阻并联的公式。
5. 写出任意个等阻值的电阻并联的特定公式。
6. 如图 6.24 所示，求总电阻 R_T 是多少？
7. 如图 6.25 所示，求总电阻 R_T 是多少？
8. 如图 6.26 所示，求总电阻 R_T 是多少？

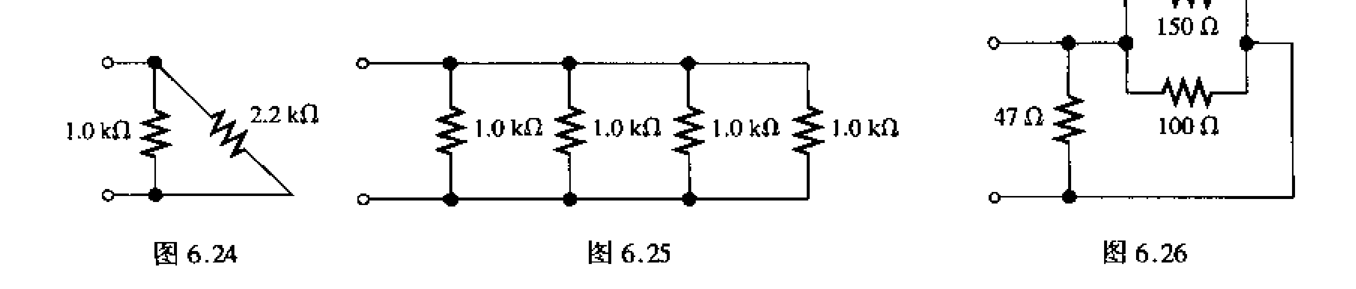


图 6.24　　图 6.25　　图 6.26

6.5 并联电路中的欧姆定律

在这一节中读者将会看到欧姆定律同样也适用于并联电路的分析。

学完本节后读者应该能够：

- 在并联电路中应用欧姆定律
- 在并联电路中确定总电流值
- 在并联电路中确定每一个支路的电流值
- 确定并联电路的电压值
- 确定并联电路的电阻值

以下例子说明了在并联电路中如何利用欧姆定律来确定总电流、支路电流、电压和电阻的值。

例 6.12 如图 6.27 所示，求电压源所产生的电流是多少？

解：从电压源看的总电阻决定了电压源产生的电流值。首先计算 R_T：

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(100\ \Omega)(56\ \Omega)}{100\ \Omega + 56\ \Omega} = \frac{5600\ \Omega^2}{156\ \Omega} = 35.9\ \Omega$$

电源电压是 100 V，根据欧姆定律，可得 I_T：

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{100\ \text{V}}{35.9\ \Omega} = \mathbf{2.79\ A}$$

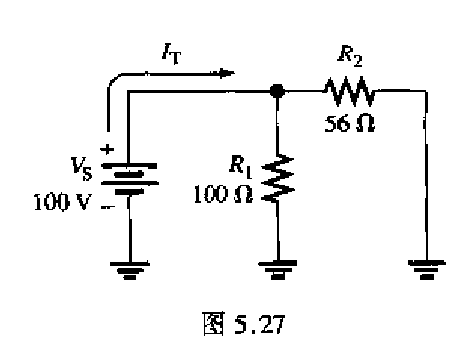


图 5.27

练习：在图 6.27 中，如果 R_2 变为 120 Ω，那么 I_T 变为多少？通过 R_1 的电流又为多少？

例 6.13 图 6.28 所示的并联电路中，求通过每个电阻的电流值分别是多少？

解：每一个电阻(支路)的电压等于电源的电压。因此，R_1 上的电压为 20 V，R_2 上的电压为 20 V，R_3 上的电压也为 20 V，则通过每一个电阻的电流即为：

$$I_1 = \frac{V_S}{R_1} = \frac{20\ \text{V}}{1.0\ \text{k}\Omega} = \mathbf{20\ mA}$$

$$I_2 = \frac{V_S}{R_2} = \frac{20\ \text{V}}{2.2\ \text{k}\Omega} = \mathbf{9.09\ mA}$$

$$I_3 = \frac{V_S}{R_3} = \frac{20\ \text{V}}{560\ \text{k}\Omega} = \mathbf{35.7\ mA}$$

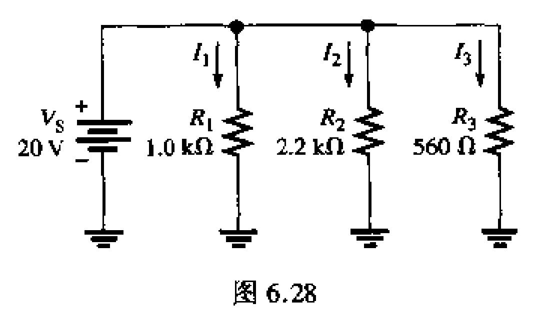


图 6.28

练习：如果增加一个 910 Ω 的电阻，并联到图 6.28 所示的电路中，求每一个支路的电流是多少？

例 6.14 如图 6.29 所示，求加在并联电路上的电压 V_S 是多少？

解：并联电路的总电流为 10 mA，如果知道总电阻，则可以根据欧姆定律计算出电压。总电阻为：

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{220\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{560\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{1.0\ \text{k}\Omega}\right)}$$

$$= \frac{1}{4.55\ \text{mS} + 1.79\ \text{mS} + 1\ \text{mS}} = \frac{1}{7.34\ \text{mS}} = 136\ \Omega$$

因此，电压源的电压为：

$$V_S = I_T R_T = (10\ \text{mA})(136\ \Omega) = \mathbf{1.36\ V}$$

练习：在图6.29中，如果 I_T 为10 mA，R_3 减小为680 Ω，那么电压是多少？

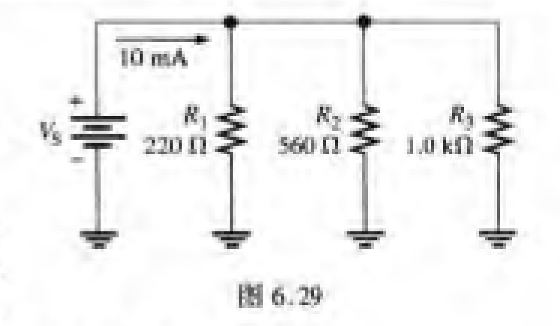


图 6.29

例6.15 图6.30所示的电路板中有3个电阻并联连接，用于设备中放大器的增益。从色环可以读出其中两个电阻的阻值，但是最上面的电阻阻值看不清楚(或者色环被磨损了)。只使用一个电压表和直流电压源，求未知电阻 R_1 的阻值是多少？

解：如果可以确定3个并联电阻的总电阻，则可以利用并联电阻的计算公式来求未知电阻的阻值。在电压和总电流已知的条件下，可以利用欧姆定律计算出总电阻。

如图6.31所示，一个12 V(其实可以是任意选定的值)的电压源连接到电阻上，可以测出总电流。利用测量的值，计算出总电阻：



$$R_T = \frac{V}{I_T} = \frac{12\ \text{V}}{24.1\ \text{mA}} = 498\ \Omega$$

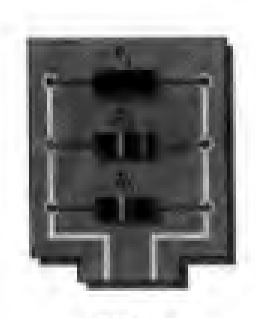


图 6.30

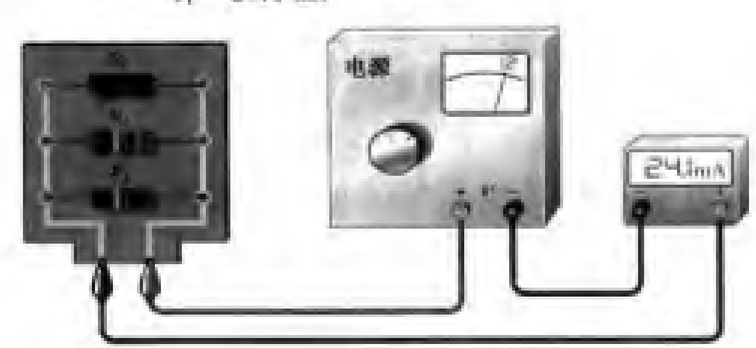


图 6.31

利用式(6.2)，计算未知电阻：

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} = \frac{1}{498\ \Omega} - \frac{1}{1.8\ \text{k}\Omega} - \frac{1}{1.0\ \text{k}\Omega} = 453\ \mu\text{S}$$

$$R_1 = \frac{1}{453\ \mu S} = \mathbf{2.21\ k\Omega}$$

练习：不把 R_1 从电路中移出来，解释怎样利用欧姆表测量 R_1 的电阻。

6.5节练习

1. 已知一个10 V的电压源加在3个阻值为68 Ω且并联连接的电阻上，那么电压源流出的总电流为多少？
2. 如图6.32所示，电路中如果要产生2 A的电流，需要多大的电压？
3. 如图6.32所示，求流过各个电阻的电流分别为多少？

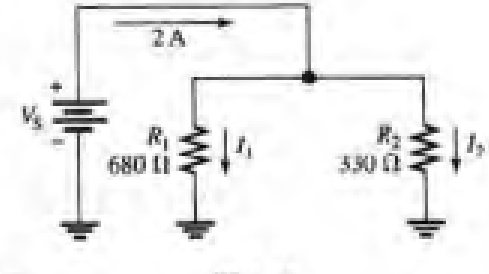


图 6.32

4. 已知4个等阻值的电阻并联连接在一个12 V的电压源上，电源的电流为5.85 mA，求电阻的阻值为多少？

5. 已知一个 1.0 kΩ 的电阻和一个 2.2 kΩ 的电阻并联连接,总电流为 100 mA,那么每个电阻上的电压降为多少?

6.6 并联的电流源

电流源是一种能量源,可以提供恒定的电流给负载,即使负载的电阻值改变,电流大小也不变。晶体管可以用做电流源,电流源在电子电路中很重要。这里不需要学习有关晶体管的知识,只需要理解并联的电流源是如何使用的。

学完本节后读者应该能够:

- 确定电流源并联连接的总效应
- 确定电源相同极性并联时的总电流
- 确定电源相反极性并联时的总电流

一般来说,并联连接的电流源的总电流值等于各个电流源电流值的代数和。代数和意味着在并联连接的电流源电路中,必须考虑到每一个电流的方向。例如在图 6.22(a)中,三个并联连接的电流源提供同一方向的电流(流入 A 节点)。因此,流入节点 A 的总电流为:

$$I_T = 1\text{ A} + 2\text{ A} + 2\text{ A} = 5\text{ A}$$

在图 6.33(b)中,1 A 的电流源提供的电流与其他电流源的方向相反。因此,流入节点 A 的总电流为:

$$I_T = 2\text{ A} + 2\text{ A} - 1\text{ A} = 3\text{ A}$$

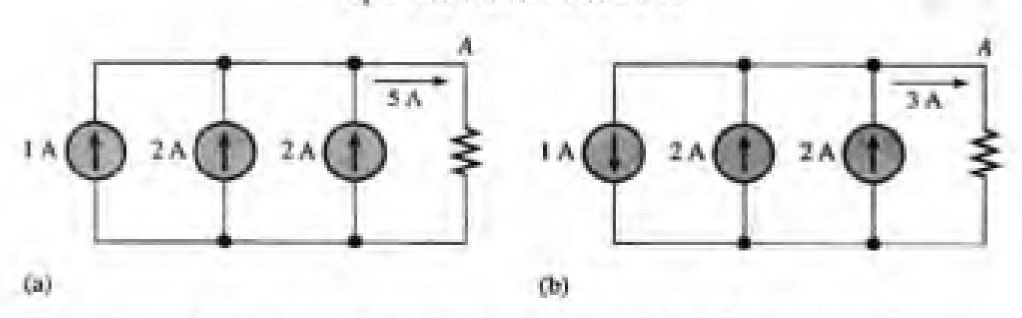


图 6.33 并联连接的电流源总电流等于各个电流源电流的代数和

例 6.16 图 6.34 所示的电路中,流过 R_L 的电流是多少?

解:两个电流源的方向相同,因此通过 R_L 的电流为:

$$I_{R_L} = I_1 + I_2 = 50\text{ mA} + 20\text{ mA} = \mathbf{70\text{ mA}}$$

练习:如果改变 I_2 的方向,求流过 R_L 的电流是多少?

图 6.34

6.6 节练习

1. 4 个方向相同的 0.5 A 电流源并联连接,流过负载的电流值为多少?
2. 输出端要产生 3 A 的电流,需要几个 1 A 的电流源?画出电流源连接的原理图。
3. 在晶体管放大电路中,可以认为晶体管是一个 10 mA 的电流源,如图 6.35 所示。在某个确定的晶体管放大器中,晶体管并联连接,求流过 R_E 的电流是多少?

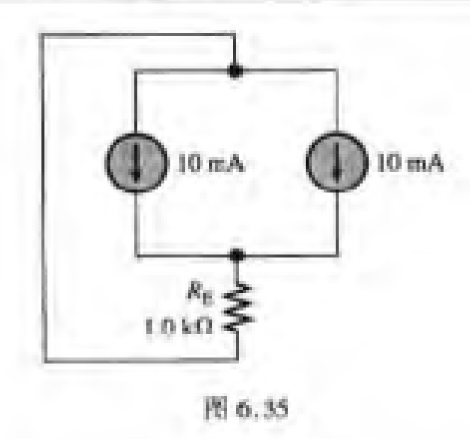


图 6.35

6.7 分流器

并联电路可以用做分流器,因为流入并联支路节点的电流分成多个独立支路的电流。

学完本节后读者应该能够:

- 将并联电路用做分流器
- 掌握分流公式的应用
- 确定未知的支路电流

并联电路中,流入并联支路节点的总电流分配到各个支路。因此,并联电路可以用做分流器。分流器的原理如图 6.36 所示,两个并联支路电路的总电流 I_T 可以分成流过 R_1 和 R_2 这两个部分的电流。

由于分布在每个并联电阻上的电压相同,因此支路电流的大小同电阻的阻值成反比。例如,如果 R_2 的阻值是 R_1 的两倍,则电流值 I_2 是 I_1 的一半。换句话说,

总电流分配到每个并联电阻中的电流值是和电阻值成反比的。

根据欧姆定律,电阻值比较大的支路,流过的电流比较小;电阻值比较小的支路,流过的电流比较大。如果所有支路的阻值相同,则支路电流都相同。

图 6.37 所示的是用比较特殊的值来证明分流器如何根据支路电阻的阻值分配。注意在这个例子中,上面支路的阻值是下面支路的十分之一,上面支路的电流却是下面支路的十倍。

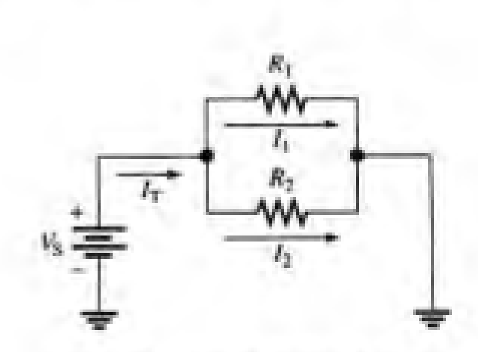


图 6.36 总电流分成两个支路

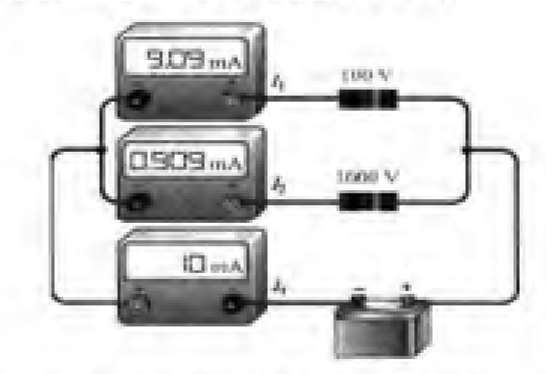


图 6.37 电阻值比较大的支路电流比较小,而电阻值比较小的支路电流比较大

6.7.1 两个支路时的分流公式

实际电路中,两个并联电阻是很常见的。由式(6.5)可得,两个支路并联时总电阻的公式是:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

图 6.38 所示的电路中,有两个电阻并联。想要求得每个支路的电流,需要下面两个公式。

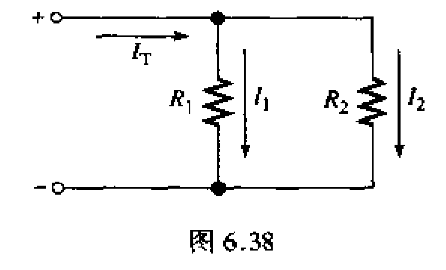


图 6.38

I_1 和 I_2 的公式可写成:

$$I_1 = \left(\frac{R_T}{R_1}\right)I_T \quad 和 \quad I_2 = \left(\frac{R_T}{R_2}\right)I_T$$

将 $R_1R_2/(R_1+R_2)$代入 R_T 并相消,可得:

$$I_1 = \frac{\left(\frac{\not{R_1}R_2}{R_1+R_2}\right)}{\not{R_1}}I_T \quad 和 \quad I_2 = \frac{\left(\frac{R_1\not{R_2}}{R_1+R_2}\right)}{\not{R_2}}I_T$$

因此,两个支路的分流公式写成如下形式:

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)I_T \tag{6.8}$$

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)I_T \tag{6.9}$$

值得注意的是,在式(6.8)和式(6.9)中,其中一个支路的电流等于另一个支路的电阻除以两电阻之和,再乘以总电流的值。在分流公式的所有应用中,首先必须知道流入并联支路的总电流。例 6.17 说明了这些特殊的分流公式的应用。

例 6.17 图 6.39 所示的电路中,电流 I_1 和 I_2 分别是多少?

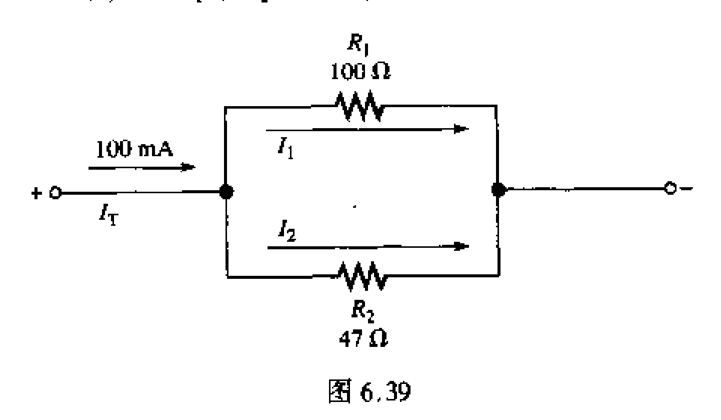


图 6.39

解:由式(6.8),可求得 I_1:

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)I_T = \left(\frac{47\ \Omega}{147\ \Omega}\right)100\ \text{mA} = \mathbf{32.0\ mA}$$

由式(6.9),可求得 I_2:

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)I_1 = \left(\frac{100\ \Omega}{147\ \Omega}\right)100\ \text{mA} = \mathbf{68.0\ mA}$$

练习:如果在图 6.39 中,$R_1 = 56\ \Omega$,$R_2 = 82\ \Omega$,且电流不变,那么每个支路的电流分别是多少?

6.7.2 任意个数并联支路分流的一般公式

通过几个简单的步骤,可以得到电流在每个并联电阻上如何分配的公式。假设有 n 个电阻并联,如图 6.40 所示,其中 n 是任意数。

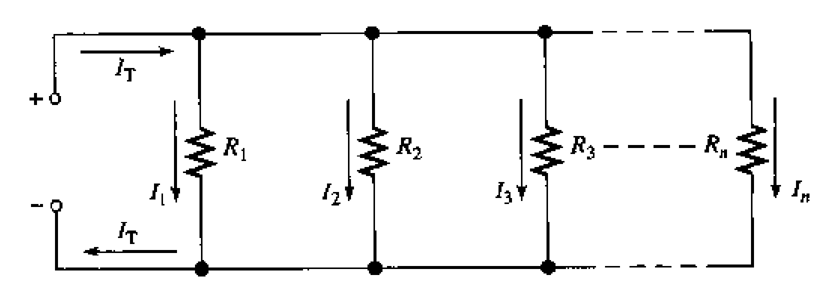


图 6.40　有 n 个支路的一般并联电路

假设流过任意一个并联电阻的电流是 I_x,其中 x 表示特定电阻的序号(1,2,3,…)。根据欧姆定律,在图 6.40 中,通过任意一个电阻的电流可写成如下形式:

$$I_x = \frac{V_S}{R_x}$$

电源电压 V_S 加在了每个并联电阻上,R_x 代表并联电阻中的任意一个。总电源电压 V_S 等于总电流和并联总电阻的乘积:

$$V_S = I_T R_T$$

将 V_S 替换成 $I_T R_T$,则结果 I_x 为:

$$I_x = \frac{I_T R_T}{R_x}$$

整理各项,可得:

$$I_x = \left(\frac{R_T}{R_x}\right) I_T \tag{6.10}$$

其中,$x = 1,2,3,\cdots$。式(6.10)是应用于任意个数并联支路分流的一般公式。

通过任意支路的电流(I_x)等于总电阻(R_T)除以该支路电阻(R_x),再乘以流入并联支路节点的总电流。

例 6.18　图 6.41 所示的电路中,流过每个电阻的电流是多少?

解:首先计算并联总电阻:

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{680\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{330\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{220\ \Omega}\right)}$$

总电流是 10 A,利用式(6.10),可以得到每个支路的电流:

$$I_1 = \left(\frac{R_T}{R_1}\right) I_T = \left(\frac{111\ \Omega}{680\ \Omega}\right) 10\ \text{A} = \mathbf{1.63\ A}$$

$$I_2 = \left(\frac{R_T}{R_2}\right) I_T = \left(\frac{111\ \Omega}{330\ \Omega}\right) 10\ \text{A} = \mathbf{3.36\ A}$$

$$I_3 = \left(\frac{R_T}{R_3}\right) I_T = \left(\frac{111\ \Omega}{220\ \Omega}\right) 10\ \text{A} = \mathbf{5.05\ A}$$

图 6.41

练习:在图 6.41 中,如果移开 R_3,流过每个电阻的电流将是多少?

6.7 节练习

1. 写出两个支路中计算每个支路电流的两个特殊公式。
2. 写出分流的一般公式。

3. 已知电路中并联连接到电压源的各个电阻分别是 220 Ω,100 Ω,82 Ω,47 Ω 和 22 Ω,那么流过哪一个电阻的电流最大?哪一个最小?
4. 图 6.42 所示的电路中,I_1 和 I_2 是多少?
5. 图 6.43 所示的电路中,流过 R_3 的电流是多少?

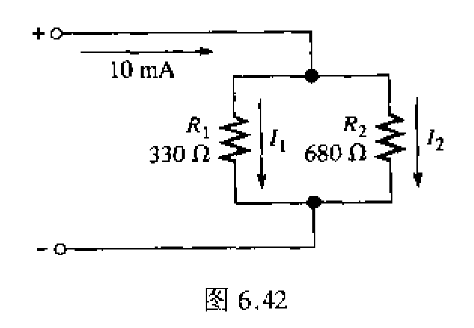


图 6.42

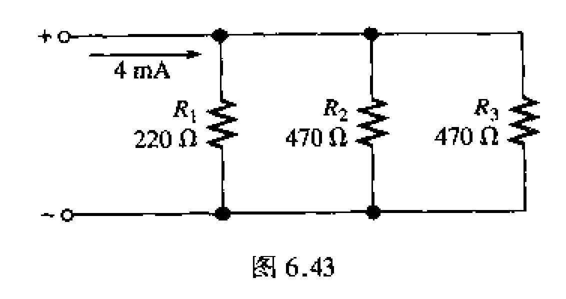


图 6.43

6.8 并联电路中的功率

并联电路中的总功率等于各个电阻功率的总和,如同串联电路一样。

学完本节后读者应该能够:

- 确定并联电路中的功率

式(6.11)给出了对于任意数目支路并联的电路中总功率的简单计算方法。

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n \tag{6.11}$$

其中,P_T 是总功率,P_n 为并联电路中第 n 个电阻的功率。可以发现,功率具有可加性,如同串联电路中的一样。

在第 4 章中给出的功率公式可以直接应用于并联电路。以下公式可用于计算总功率 P_T:

$$P_T = VI_T$$

$$P_T = I_T^2 R_T$$

$$P_T = \frac{V^2}{R_T}$$

其中,V 是加在并联电路上的电压,I_T 是流入并联电路的总电流,R_T 是并联电路的总电阻。例 6.19 说明了如何计算并联电路的总功率。

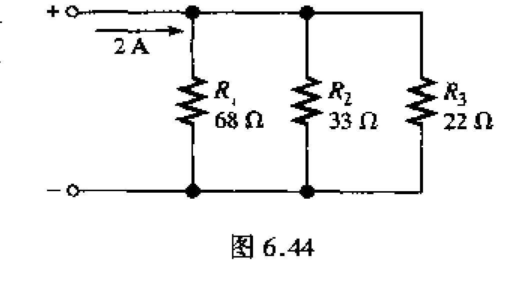


图 6.44

例 6.19 图 6.44 所示的并联电路中,总功率是多少?

解:总电流为 2 A,则总电阻为:



$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{68\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{33\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{22\ \Omega}\right)} = 11.1\ \Omega$$

因为 I_T 和 R_T 都是已知的,所以最简单的功率公式为 $P_T = I_T^2 R_T$。由此可得:

$$P_T = I_T^2 R_T = (2\ \text{A})^2(11.1\ \Omega) = \mathbf{44.4\ W}$$

如果将求得的每个电阻的功率都相加,将会得到相同的答案。下面用另一种方法计算。首先,求出各个电路中各个支路上的电压:

$$V = I_T R_T = (2\ \text{A})(11.1\ \Omega) = 22.2\ \text{V}$$

记住,加在每一个支路上的电压相同。

接着,利用 $P=V^2/R$,求每个电阻上的功率:

$$P_1=\frac{(22.2\ \text{V})^2}{68\ \Omega}=7.25\ \text{W}$$

$$P_2=\frac{(22.2\ \text{V})^2}{33\ \Omega}=14.9\ \text{W}$$

$$P_3=\frac{(22.2\ \text{V})^2}{22\ \Omega}=22.4\ \text{W}$$

然后把各个功率相加,求得总功率:

$$P_T=7.25\ \text{W}+14.9\ \text{W}+22.4\ \text{W}=44.6\ \text{W}$$

这个计算结果证明,求得的各个功率相加之和近似等于由一个功率公式求得的总功率,差值是限于三个有效数字而舍入(进位)的值。

练习:如果图 6.44 中的总电流增加一倍,求总功率是多少?

例6.20 如图 6.45 所示,放大器通过一个支路连接立体声系统,驱动 4 个扬声器。如果扬声器的最大电压为 15 V,那么放大器应该提供多大的功率?

解:扬声器并联连接在放大器的输出端,因此每个支路上的电压相同。每个扬声器的最大的功率为:

$$P_{\max}=\frac{V_{\max}^2}{R}=\frac{(15\ \text{V})^2}{8\ \Omega}=28.1\ \text{W}$$

放大器提供的总功率应该是单个扬声器功率的 4 倍,才能驱动 4 个扬声器,因为总功率是各个功率的总和:

$$P_{T(\max)}=P_{(\max)}+P_{(\max)}+P_{(\max)}+P_{(\max)}=4P_{(\max)}$$
$$=4(28.1\ \text{W})=\mathbf{112.4\ W}$$

图 6.45

练习:如果放大器最大可以提供 18 V 的电压,那么扬声器的最大功率为多少?

6.8 节练习

1. 如果已知并联电路中每个电阻的功率,如何求得总功率?
2. 并联电路中各个电阻消耗的功率分别为 2.38 W,5.12 W,1.09 W 和 8.76 W,那么电路的总功率为多少?
3. 如果电路中并联电阻的阻值分别为 1.0 kΩ,2.7 kΩ 和 3.9 kΩ,并联电路总电流为1 A,求总功率是多少?

6.9 并联电路应用实例

实际应用中,并联电路在每个电子系统中都有多种形式。读者在以后的课程中学到许多复杂的概念和相关主题后,就可以清晰地看出元件的并联关系。目前,我们先看一些简单并且相似的并联电路的应用。

学完本节后读者应该能够:

- 描述并联电路的一些基本应用

- 说明汽车的灯光系统
- 说明住宅的线路
- 描述如何通过热敏元件来控制电流
- 解释多量程电表的基本工作原理

6.9.1 汽车

并联电路与串联电路相比的最大优势是:其中一条支路断开后,其余的支路不受影响。例如,图 6.46 给出了一幅汽车灯光系统的简图。当前灯烧毁时,不会造成其他灯烧毁,因为这些灯是相互并联的。

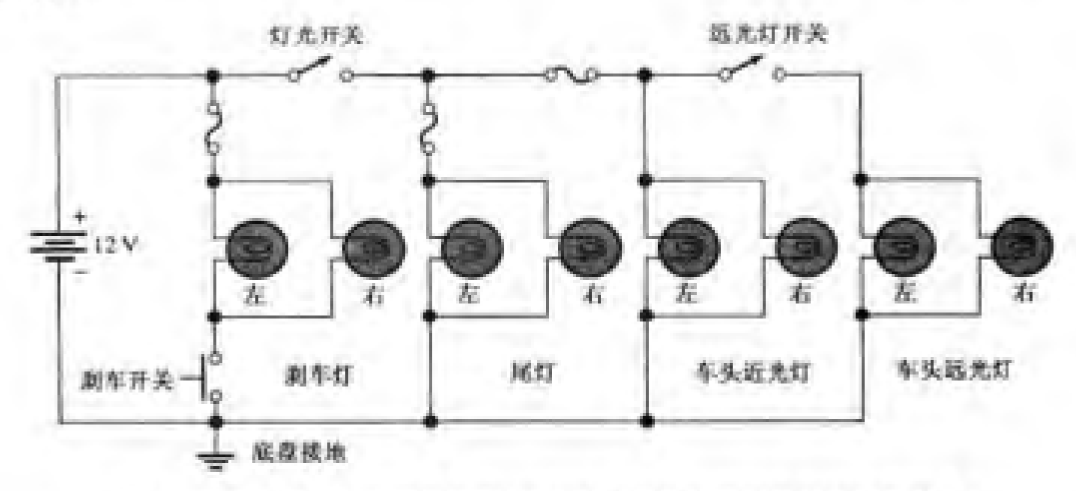


图 6.46 汽车外部灯光系统简图(开关在图示的位置时所有的灯都熄灭)

注意,刹车灯同前灯和尾灯的开关是相互独立的。只有在司机踩下刹车踏板使刹车灯的开关合上时,所有的灯才都会亮起。当灯光开关闭合时,前头的近光灯和尾灯都亮起。只有在灯光开关和远光灯开关都闭合的时候,前头的远光灯才会亮起。无论哪一个灯烧毁(开路),其他的灯依然会有电流。

6.9.2 住宅

住宅供电系统是另一个经常使用并联电路的例子。在一所房子里,所有的灯和设备都是并联连接的。图 6.47(a)显示的是一种典型的线路布置方式,两个开关控制灯和三个壁式插座都是相互并联连接的。

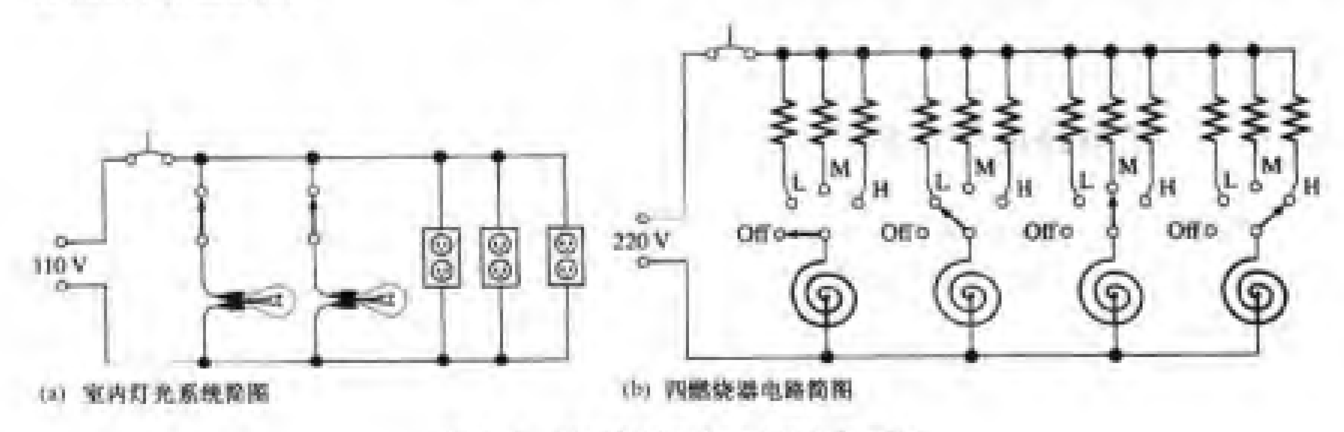


图 6.47 家居布线和应用并联电路示例

图6.47(b)中给出了一幅电路中四个热敏元件并联排列的简图。每个支路中的四端开关允许用户通过选择适当的限流电阻来控制每个热敏元件的电流值。最小的电阻值(H端)允许最大热量时的最大电流值，最大的电阻值(L端)允许最小热量时的最小电流值，M端表示中间值。

6.9.3 电流表

另一个并联电路的例子是模拟(指针型)安培表或毫安表。尽管模拟表的使用没有以前那么普遍了，但在某些地方依然应用。而且其内部并联电路的原理很重要，因为允许使用选择不同的挡位来测量不同的电流值。

安培表的内部原理使得指针偏转和电流大小成正比，叫做偏转表，是基于磁力原理的，将在后面介绍。这里只需要了解偏转表有一定的电阻和一个最大的电流值。这个最大的电流值叫做满偏电流，使得指针偏指到量程的最大位置处。例如，偏转表的电阻为50 Ω，满偏电流值为1 mA。可以用这种表来测量1 mA或小于1 mA的电流，如图6.48(a)和图6.48(b)所示。如果电流大于1 mA，会造成指针"钉"(停)在超过满偏的位置处，如图6.48(c)所示，这样会造成电表的损坏。

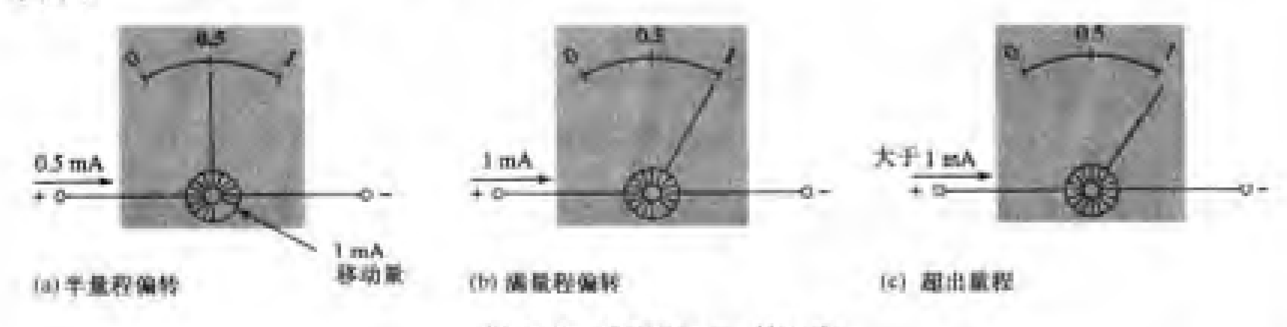


图6.48 量程为1 mA的电表

图6.49所示为一个带偏转表的简易安培表，同一个电阻并联。该电阻称为旁路电阻，作用是在测得的电流超过量程范围时旁路一部分电流。显然，通过旁路电阻的电流是9 mA，而通过偏转表的电流是1 mA。因此，超过10 mA的电流同样可以测量。为了求得实际的电流值，只须把量程上的读数乘以10即可。

实际的安培表有一个量程开关，可以选择多种满量程电流。在每一个开关位置都有一定量的电流通过并联的旁路电阻，电流的大小取决于电阻的阻值。在这些例子中，通过偏转表的电流不会大于1 mA。

图6.50所示的安培表有三个量程：1 mA，10 mA和100 mA。当量程开关选择1 mA的位置时，流入电表的所有电流都将通过偏转表。选择10 mA的位置时，最高9 mA的电流通过旁路电阻R_{SH1}，最高1 mA的电流通过偏转表。选择100 mA的位置时，最高99 mA的电流通过旁路电阻R_{SH2}，而通过偏转表的依然只有不超过满量程1 mA的电流。

如图6.50所示，要测的电流是50 mA，则指针指向量程中标有0.5的地方，可以通过0.5乘以100得到电流值。此时，有0.5 mA的电流通过偏转表(半量程偏转)，有49.5 mA的电流通过R_{SH2}。

电路中接上安培表的影响 众所周知，在电路中串联一个安培表可以测量电流。在理想状态时，电表是不应该改变被测量电流的。但实际上，电表对电路有不可避免的影响，因为其内阻和电路电阻相串联。在绝大多数情况下，电流表的内阻相对电路而言很小，可以忽略不计。

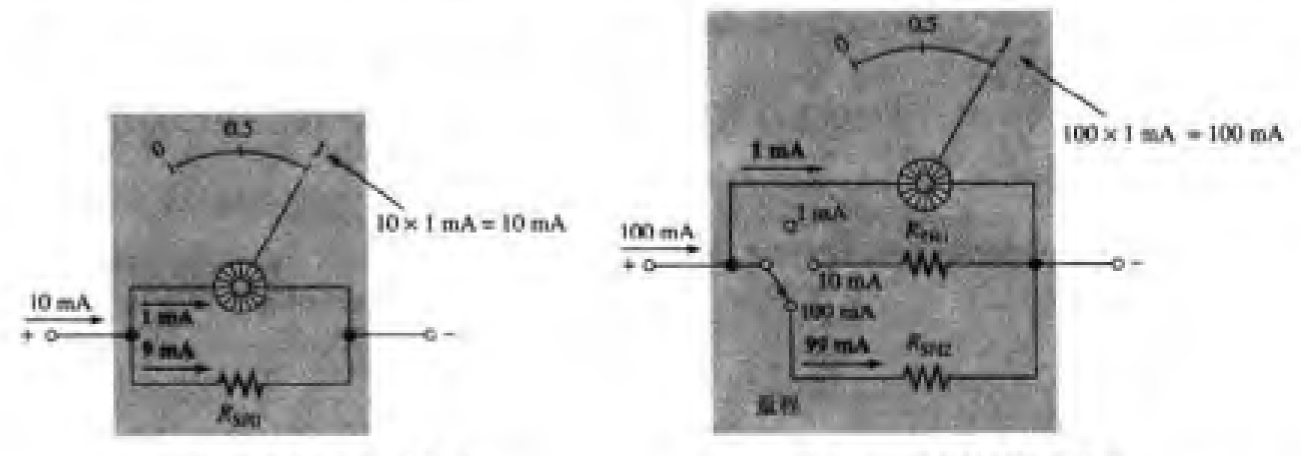


图 6.49　量程为 10 mA 的电表　　　　图 6.50　三个量程的毫安表

例如,如果安培表中有 50 Ω 偏转表的电阻(R_M),满偏电流值(I_M)为 100 μA,则偏转表上的电压降是:

$$V_M = I_M R_M = (100\ \mu A)(50\ \Omega) = 5\ mV$$

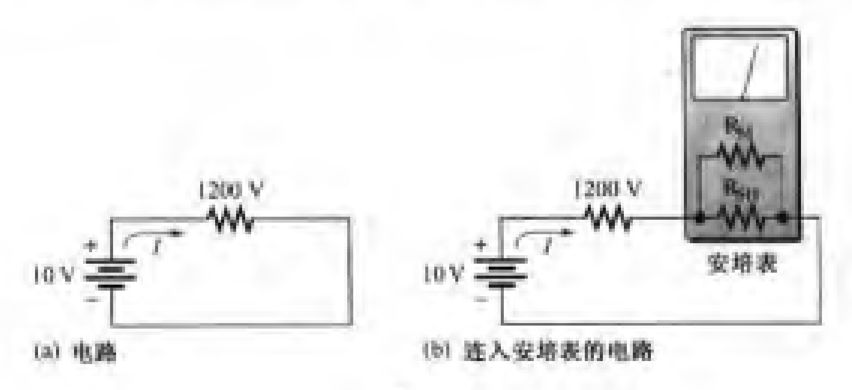
例如,对于 10 mA 量程的电表来说,旁路电阻(R_{SH})是:

$$R_{SH} = \frac{V_M}{I_{SH}} = \frac{5\ mV}{9.9\ mA} = 0.505\ \Omega$$

显然,在量程是 10 mA 时,电表的总电阻是偏转表的电阻和旁路电阻并联的阻值,即可得:

$$R_M \parallel R_{SH} = 50\ \Omega \parallel 0.505\ \Omega = 0.5\ \Omega$$

例 6.21　如图 6.51 所示,一个偏转表的内阻为 50 Ω,满偏电流值为 100 μA 的安培表连入电路,对电流有多大的影响?



(a) 电路　　(b) 连入安培表的电路

图 6.51

解:电路中最初的电流(没有安培表)是:

$$I_{orig} = \frac{10\ V}{1200\ V} = 8.3333\ mA$$

为了测量这个特定的电流值,选择安培表在 10 mA 的量程上。已知量程是 10 mA 时,安培表的电阻是 0.5 Ω。当安培表连入电路时,其内阻和 1200 Ω 的电阻串联。因此,此时电路的总电阻是 1200.5 Ω。连入安培表,电路的电流减少为新的电流值:

$$I_{new} = \frac{10\ V}{1200.5\ \Omega} = 8.3299\ mA$$

由于安培表的影响,现在的电流比电路最初的电流小了 **3.4 μA** 或 **0.04%**。

因此,安培表对电流值的影响并不是很大。当然,如果要求精确测量,测量仪器是不应该改变测量值的。

练习:图6.51中,如果电路的电阻是12 kΩ,而不是1200 Ω,那么测量的电流与最初的电流有多大区别?

6.9 节练习

1. 如果将如图6.51所示的安培表连入电路,那么表内电阻的最大值是多少?可测量的最大电流是多少?
2. 旁路电阻的阻值应该比偏转表中的阻值大还是小?为什么?

6.10 故障检修

在这一节,读者将会了解到一个并联支路的开路对整个并联电路的影响。

学完本节读者应该能够:

- 分析并联电路的故障
- 检查一个开路电路

开路支路

开路电路是一个电流通路阻断,没有电流的电路。在这一节,将检测一个并联支路开路时产生的结果。

如果在一个并联电路的支路上连接一个开关,通过开关,可以控制一个通路的闭合和断开,如图6.52所示。如果开关闭合,R_1 和 R_2 并联,如图6.52(a)所示。总电阻为50 Ω(两个100 Ω的电阻并联),电流流过两个电阻。如果开关断开,如图6.52(b)所示,R_1 等效于从电路中移开,总电阻变为100 Ω。此时,电流只通过 R_2。一般情况下,

当并联电路的一个支路开路时,总电阻增加,总电流减小,该电流继续通过余下的并联通路。

总电流的减少值等于开路支路中原来的电流值,其余支路的电流仍保持不变。

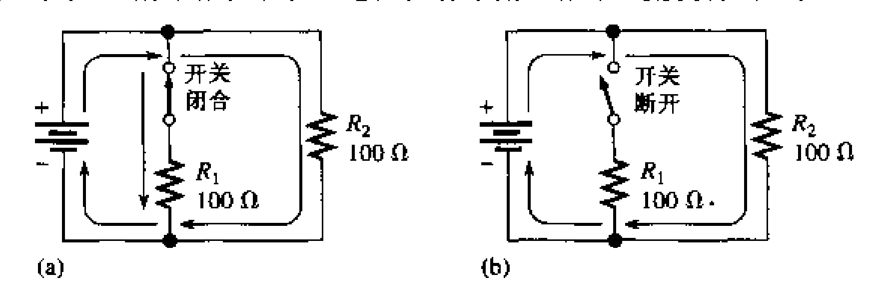


图6.52 当开关断开时,总电流减少,通过 R_2 的电流不变

图6.53所示的是一个电灯电路,四个灯泡并联在120 V的电源上。在图6.53(a)中,电流通过每一个灯泡。现在假设其中一个灯泡烧毁了,则会产生一个开路支路,如图6.53(b)所示。这个灯泡不会亮,是因为没有电流通过这个开路支路。然而,电流仍然继续通过其余并联支路上的灯泡,使之发光。这个开路支路并没有改变通过并联支路上的电压,电压仍为120 V。同样,通过每一个支路的电流仍保持不变。

在电灯系统中,可以看出并联电路与串联电路相比有一个优点:如果一条或一条以上支路上的电灯烧毁,并不会影响其他灯泡。在串联电路中,若一个灯泡烧毁,那么其余的灯泡也就不会亮,因为串联电路完全断开了。

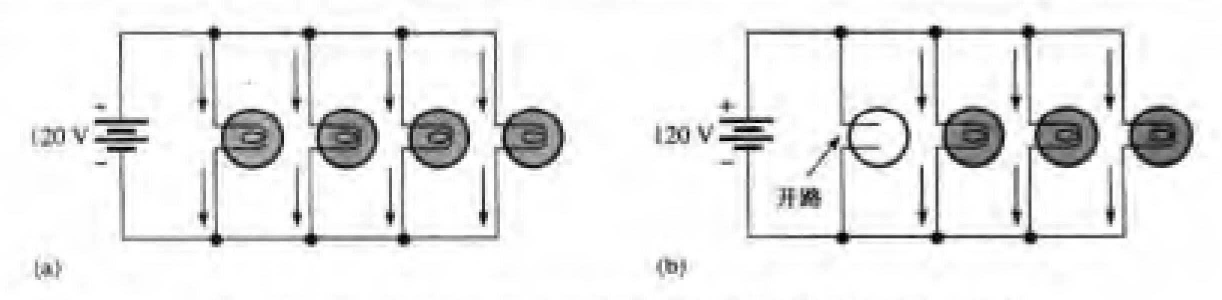


图 6.53　当一盏灯开路时，总电流减少，但通过其他支路的电流不变

当并联电路中的一个电阻开路时，不能通过测量电阻的电压来确定是哪一个电阻开路，因为所有支路的电压都相同。一个好的电阻的开路电压同样等于电路中的电压，如图 6.54 所示(中间的电阻开路)。

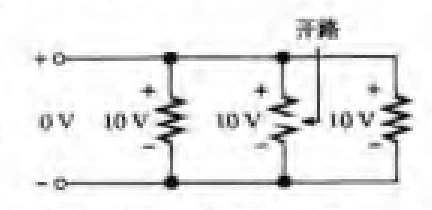


图 6.54　并联分支(无论是否开路)的电压相同

如果通过直接检查不能找到开路的电阻，那么必须通过测量电流的方法来检查。一般而言，测量电流比测量电压难，因为必须把电流表串联在电路中测量电流。因此，为了串联连接电流表，必须断开导线或 PC 板上的连接，或者将其中一个终端从电路板中拆除。当然，在测量电压时并不需要这个步骤，因为电压表只需要直接把引线连到被测元件上即可。

6.10.1　通过测量电流确定开路支路

在并联电路中，如果怀疑有支路开路，就必须测量总电流。并联电阻开路时，总电流 I_T 总是比电流的理论值小。一旦电流 I_T 和通过支路的电压已知，且每个电阻的阻值不同，只需要很少的计算就能确定是哪个电阻开路。

图 6.55(a)所示的是一个两条支路的电路。如果其中的一个电阻开路，总电流会等于通过好的电阻的电流。根据欧姆定律，可以很快得出每一个电阻上通过的电流值：

$$I_1 = \frac{50\ \text{V}}{560\ \Omega} = 89.3\ \text{mA}$$

$$I_2 = \frac{50\ \text{V}}{100\ \Omega} = 500\ \text{mA}$$

$$I_T = I_1 + I_2 = 589.3\ \text{mA}$$

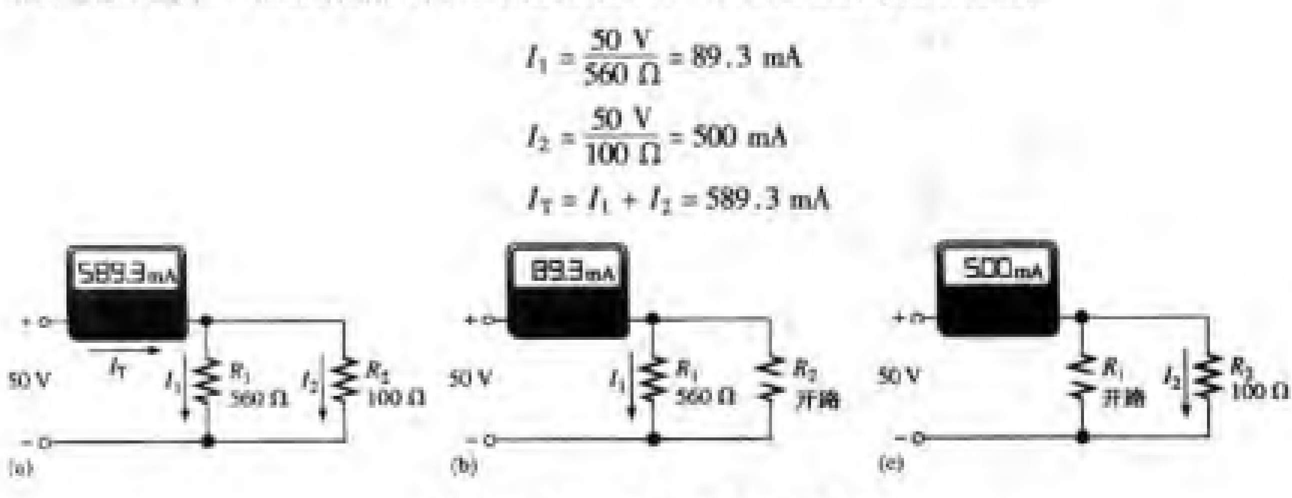


图 6.55　通过测量电流，确定开路支路

如果 R_2 开路，总电流为 89.3 mA，如图 6.55(b)所示。如果 R_1 开路，总电流为 500 mA，如图 6.55(c)所示。

这个方法可广泛应用到任意支路数目、使用不同阻值电阻的电路中。如果并联电路的电阻值相同，必须测量每条支路的电流，直到找出哪条支路没有电路为止，该支路即为开路。

例 6.22　如图 6.56 所示，已知总电流为 31.09 mA，各并联支路的电压为 20 V。那么电路中是否有电阻开路？如果有，是哪个电阻？

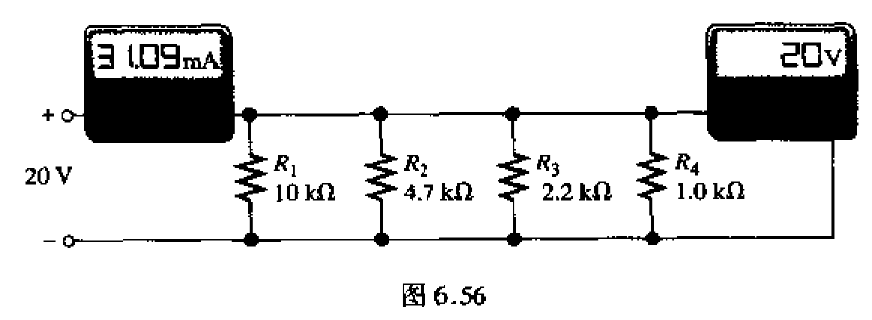


图 6.56

解：计算各支路的电流：

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{20\ \text{V}}{10\ \text{k}\Omega} = 2\ \text{mA}$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{20\ \text{V}}{4.7\ \text{k}\Omega} = 4.26\ \text{mA}$$

$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{20\ \text{V}}{2.2\ \text{k}\Omega} = 9.09\ \text{mA}$$

$$I_4 = \frac{V}{R_4} = \frac{20\ \text{V}}{1.0\ \text{k}\Omega} = 20\ \text{mA}$$

则总电流为：

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 2\ \text{mA} + 4.26\ \text{mA} + 9.09\ \text{mA} + 20\ \text{mA} = 35.35\ \text{mA}$$

图中测得的实际电流是 31.09 mA，比理论值少了 4.26 mA，说明通过电流为 4.26 mA 的支路开路，即 R_2 开路。

练习：如果图 6.56 中开路的是 R_4，而不是 R_2，那么测量的总电流是多少？

6.10.2　通过测量电阻确定开路支路

如果并联电路可以从电压源或其他电路中断开，可以通过测量前后的总电阻确定哪条分路为开路支路。

电导 G 是电阻的倒数（$1/R$），单位为西门子（S）。在式（6.3）中，并联电路的总电导等于各条支路电导之和：

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n$$

确定开路支路，步骤如下：

1. 通过各个电阻的阻值，计算总电导：

$$G_{T(\text{calc})} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

2. 利用欧姆表测量总电阻，并计算总电导：

$$G_{T(\text{meas})} = \frac{1}{R_{T(\text{meas})}}$$

3. 把第 1 步中测量的总电导减去第 2 步中计算所得的总电导，其值的倒数（$R = 1/G$）即为开路电阻的阻值：

$$R_{\text{open}} = \frac{1}{G_{T(\text{calc})} - G_{T(\text{meas})}} \tag{6.12}$$

例 6.23 如图 6.57 所示，检查 PC 板中的开路支路。

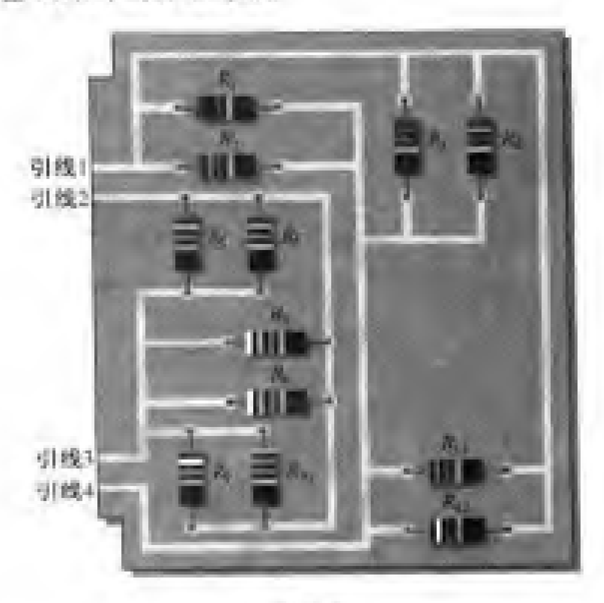


图 6.57

解：电路板中有两个独立的并联支路。对引线 1 和引线 4 之间的电路做如下的检查(假设其中一个电阻开路)：

1. 通过各个电阻的阻值，计算总电导：

$$G_{T(calc)}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_{11}}+\frac{1}{R_{12}}$$

$$=\frac{1}{1.0\ \mathrm{k\Omega}}+\frac{1}{1.8\ \mathrm{k\Omega}}+\frac{1}{2.2\ \mathrm{k\Omega}}+\frac{1}{2.7\ \mathrm{k\Omega}}+\frac{1}{3.3\ \mathrm{k\Omega}}+\frac{1}{3.9\ \mathrm{k\Omega}}=2.94\ \mathrm{mS}$$

2. 利用欧姆表测量总电阻，并计算总电导。假设欧姆表测量的阻值为 402 Ω。

$$G_{T(meas)}=\frac{1}{402\ \Omega}=2.49\ \mathrm{mS}$$

3. 把第 1 步中测量的总电导减去第 2 步中计算所得的总电导，所得结果是开路支路的电导。求其倒数即可得开路支路的电阻：

$$G_{open}=G_{T(calc)}-G_{T(meas)}=2.94\ \mathrm{mS}-2.49\ \mathrm{mS}=0.45\ \mathrm{mS}$$

$$R_{open}=\frac{1}{G_{open}}=\frac{1}{0.45\ \mathrm{mS}}=2.2\ \mathrm{k\Omega}$$

电阻 R_3 为开路，需要替换。

练习：如图 6.57 所示，利用欧姆表，测量得到 PC 板上引线 2 和引线 3 之间的电阻为 9.6 kΩ，判断此结果是否正确，如果不正确，应是哪个电阻开路？

6.10.3 短路支路

当并联电路中的一条路短路时，总电流增加过多会导致电阻烧坏、保险丝熔断或断路器断开。因为很难使短路支路分离出来，所以这是一个比较有难度的故障问题。

6.10 节练习

1. 如果并联支路断开，电路电压和电流会有什么变化，假设并联电路所加的电压源为恒压源。

2. 如果有一条支路开路，那么总电阻会有什么变化？
3. 多个电灯并联连接，如果其中一个灯泡开路（烧坏），其他灯是否仍然发光？
4. 在并联电路中，每条支路的电流为 1 A。如果其中一条支路开路，其他支路的电流是多少？
5. 一条三支路的电路中，电流分别为 1 A、2.5 A 和 1.2 A。如果总电流为 3.5 A，哪条支路为开路呢？

技术实践

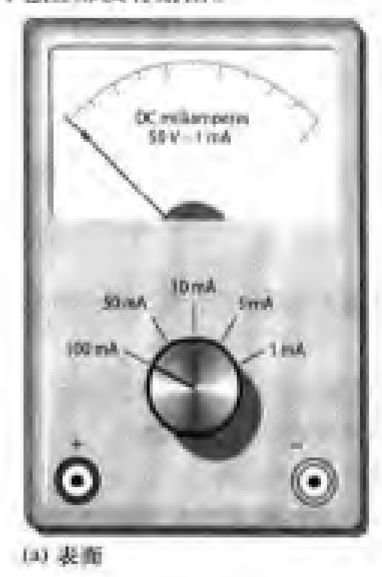
在日常检修中发现一个五量程毫安表的装配线已经坏了。测量超过 1 mA 的任意电流，选择任意一个除了 1 mA 和 50 mA 以外的量程，指针都会超出刻度的右边界。在这两个量程之中，电表似乎可以正常工作。前面我们已经学到，多量程安培表的电路基于旁路电阻和偏转表并联，需要使指针满偏。你的任务是分析电表的故障，并确定修复该表所需的物品。

安培表电路

安培表的表面如图 6.58(a)所示，移开安培表的外壳，可以看见电路如图 6.58(b)所示。五环电阻的允许误差是 1%。第 2 章中曾介绍过，前三环代表电阻的阻值，第四环中的金色代表乘以 0.1，银色代表乘以 0.01，第五环的棕色代表 1%的允许偏差。

原理图

- 安培表的原理图如图 6.59 所示。仔细检查图 6.58(b)中的电路连接图，确保和原理图一致。如果存在线路问题，说明如何进行修复。连接在电路中的电阻 R_1 和 R_2 等都可以确定。100 mA 的位置标有“1”。在此图中，电阻都没有给出。



(a) 表面



(b) 电路图

图 6.58

故障检修

假设已经找到安培表电路中存在的线路问题并且更正过来。现在，假设已经把安培表连到测试仪器，检验它是否正常工作。结果发现，安培表在 1 mA、5 mA、10 mA 和 50 mA 量程都能正常工作，但被测电流为 50 mA或大于 50 mA，选择 100 mA 量程时，指针依然超出量程。

由于在 100 mA 量程时指针超出量程，表示全部或绝大部分的电流都通过了偏转表。由于旁路电阻分担了绝大部分被测电流，因此通过偏转表的电流不会超过其最大值 1 mA。所以问题可能是其中的一个旁路电阻没有连上、开路，或者阻值太高。

■ 再次检查图 6.58(a)所示电路中的其他连线和 R_4 及 R_5 的色环阻值。由于某些原因,原理图中并未标明电阻的阻值,所以必须应用欧姆定律和分流公式的知识来确定电阻的阻值。参考附录 A 中的标准电阻阻值表。

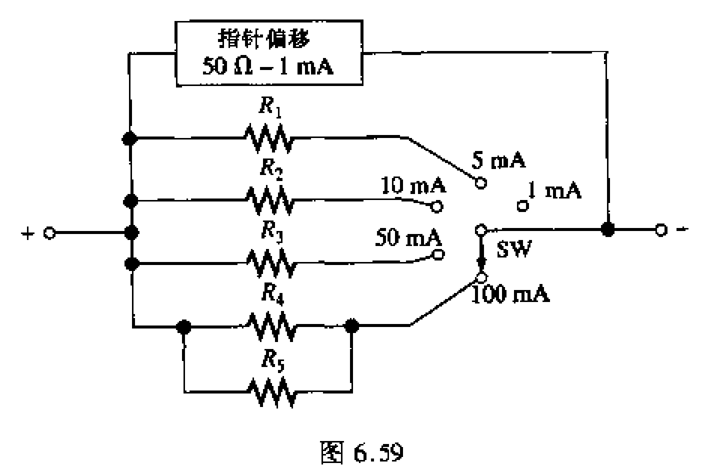


图 6.59

技术实践练习

1. 如图 6.58 所示,当量程选择开关在 1 mA 的位置时,毫安表正负极之间的总电阻是多少? 在 5 mA 的位置呢? 在 10 mA 的位置呢?
2. 开关在 5 mA 的位置时,指针指向刻度盘的中点,被测电流是多少?
3. 开关在 5 mA 的位置时,电流值由习题 2 求得,通过偏转表和旁路电阻的电流分别是多少?

小结

■同一独立节点上的电阻并联连接。
■并联电路有一条以上的电路通路。
■电流通路的数目等于电阻并联的数目。
■并联总电阻的阻值小于电路中最小电阻的阻值。
■并联电路中各条支路上的电压相同。
■并联电流源的电流值代数相加。
■ 基尔霍夫电流定律:流入一个节点的电流总和(总输入电流)等于流出同一节点的电流总和(总输出电流);流入和流出同一节点电流的代数和等于零。
■并联电路是一个分流器,因为进入并联支路的节点的电流分成多路,流入每条支路。
■如果并联电路中所有电阻的阻值相同,那么通过所有支路的电流值相同。
■并联电阻电路中的总功率等于并联电路中各个电阻功率的总和。
■已知总电流、总电阻或总电压的值,利用功率公式,可以计算出一个并联电路的总功率。
■如果并联电路中的一条支路开路,那么总电阻增加,总电流减小。
■如果并联电路中的支路开路,其他各条支路的电流保持不变。

主要术语

支路:并联电路中的一条电流通路。

分流器:并联电路中,每条并联支路中的电流值和支路中的电阻阻值成反比。

节点:两个或两个以上的部分连接的点。

基尔霍夫电流定律:流进一个节点的总电流等于流出该节点的总电流。

并联:电子电路中的一种关系,表示在两个相同的独立点上连接两个成两个以上的电流通路。

公式

6.1 $I_{IN(1)} + I_{IN(2)} + \cdots + I_{IN(n)} = I_{OUT(1)} + I_{OUT(2)} + \cdots + I_{OUT(m)}$ 基尔霍夫电流定律

6.2 $\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$ 并联总电阻的倒数

6.3 $G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots\cdots + G_n$ 总电导

6.4 $R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{R_n}\right)}$ 并联总电阻

6.5 $R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 两电阻并联的特例

6.6 $R_T = \frac{R}{n}$ 等阻值并联的特例

6.7 $R_x = \frac{R_A R_T}{R_A - R_T}$ 未知并联电阻

6.8 $I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) I_T$ 两支路的分流公式

6.9 $I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) I_T$ 两支路的分流公式

6.10 $I_x = \left(\frac{R_T}{R_x}\right) I_T$ 分流的一般公式

6.11 $P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n$ 总功率

6.12 $R_{open} = \frac{1}{G_{T(calc)} = G_{T(meas)}}$ 开路支路的电阻

自测题

1. 在并联电路中,每个电阻有:
   (a) 一样的电流 (b) 一样的电压 (c) 一样的功率 (d) 以上都是
2. 若一个 1.2 kΩ 的电阻和一个 100 kΩ 的电阻并联连接,则总电阻将:
   (a) 大于 1.2 kΩ (b) 大于 100 Ω 但小于 1.2 kΩ
   (c) 小于 100 Ω 但大于 90 Ω (d) 小于 90 Ω
3. 若一个 330 Ω 的电阻、一个 270 Ω 的电阻和一个 68 Ω 的电阻并联连接,则总电阻近似等于:
   (a) 668 Ω (b) 47 Ω (c) 68 Ω (d) 22 Ω
4. 8 个电阻并联,其中 2 个最小的电阻阻值都是 1.0 kΩ,则总电阻将:
   (a) 小于 8 kΩ (b) 大于 1.0 kΩ (c) 小于 1.0 kΩ (d) 小于 500 Ω
5. 若增加一个电阻连接到已存在的并联电路中,则总电阻将:
   (a) 减小 (b) 增加 (c) 保持不变 (d) 增加的值为加入电阻的阻值
6. 若移出并联电路中的一个电阻,则总电阻将:
   (a) 减少的值为移出电阻的阻值 (b) 保持不变 (c) 增加 (d) 加倍
7. 流入一个节点的电流一个是 5 A,另一个是 3 A,则流出该节点的总电流是:
   (a) 2 A (b) 未知 (c) 8 A (d) 这两个中比较大的一个
8. 并联电压源上电阻的阻值如下:390 Ω,560 Ω 和 820 Ω,那么电流最小的电阻是:
   (a) 390 Ω (b) 560 Ω (c) 820 Ω (d) 由于电压未知,难以确定
9. 流入并联电路的总电流突然增大,可能是:
   (a) 短路 (b) 电阻开路 (c) 电源电压的减少 (d) (b)或(c)

10. 一个四支路的并联电路中,已知每个支路的电流是 10 mA。如果其中一条支路开路,那么其他三条支路的电流分别是:
   (a) 13.3 mA (b) 10 mA (c) 0 A (d) 30 mA
11. 某个三支路并联电路中,流过 R_1 的电流是 10 mA,流过 R_2 的电流是 15 mA,流过 R_3 的电流是 20 mA,测得的总电流是 35 mA,那么:
   (a) R_1 开路 (b) R_2 开路 (c) R_3 开路 (d) 电路工作正常
12. 已知流入三支路并联电路的总电流是 100 mA,其中两个是 40 mA 和 20 mA,那么第三条支路的电流是:
   (a) 60 mA (b) 20 mA (c) 160 mA (d) 40 mA
13. PC 板上 5 个并联电阻,其中一个彻底短路,很有可能会造成的结果是:
   (a) 短路电阻将会烧毁 (b) 一个或一个以上的其他电阻将会烧毁
   (c) 电源的保险丝将会烧毁 (d) 电阻值将会改变
14. 已知电路有 4 条并联支路,每条支路消耗的功率是 1 W,那么消耗的总功率是:
   (a) 1 W (b) 4 W (c) 0.25 W (d) 16 W

故障检修测验

参见图 6.63

1. 开关的位置如图所示,如果 R_1 开路,那么点 A 的对地电压将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
2. 如果开关从点 A 掷向点 B,那么总电流将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
3. 如果开关在点 C,且 R_4 开路,那么总电流将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
4. 如果开关在点 B,且点 B 和点 C 短路,那么总电流将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

参见图 6.69(b)

5. 如果 R_2 开路,那么通过 R_1 的电流将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
6. 如果 R_3 开路,那么它两端的电压将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
7. 如果 R_1 开路,那么它两端的电压将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

参见图 6.70

8. 如果可变电阻器 R_2 的电阻变大,那么通过 R_1 的电流将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
9. 如果保险丝烧断,那么通过可变电阻 R_2 的电流将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变
10. 如果可变电阻 R_2 中的触点和地短路,那么通过它的电流将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

参见图 6.74

11. 如果开关在点 C 时 2.25 mA 的电源开路,那么通过 R 的电流将:
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

12. 如果开关在点 B 时 2.25 mA 的电源开路，那么通过 R 的电流将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

参见图 6.82

13. 如果引线 4 和引线 5 短路，那么引线 3 和引线 6 之间的电阻将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

14. 如果 R_1 下面的连接点和 R_5 上面的连接点短路，那么引线 1 和引线 2 之间的电阻将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

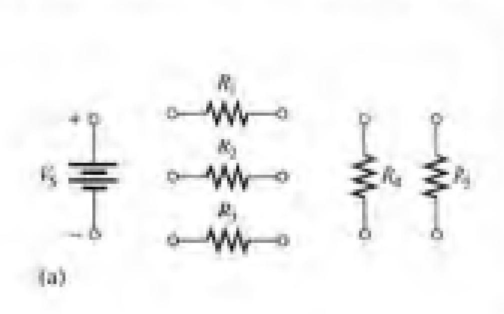
15. 如果 R_2 开路，那么引线 5 和引线 6 之间的电阻将：

(a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

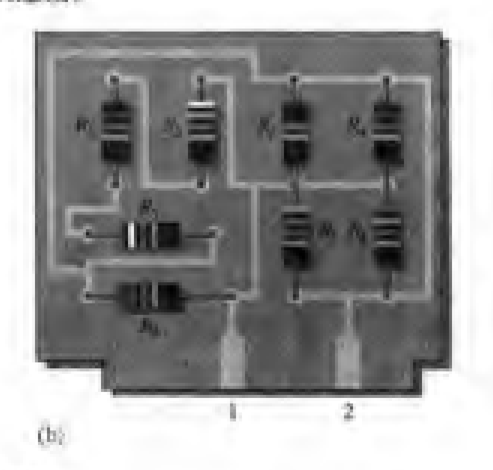
习题（较难的题目标有星号，奇数编号题目的答案在本书最后）

6.1节　并联的电阻

1. 如图 6.60(a)所示，画出电阻如何通过电源并联连接。



(a)

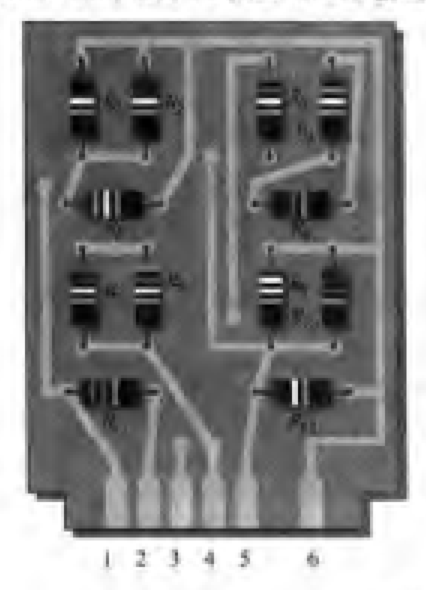


(b)

图 6.60

2. 判断图 6.60(b)中印刷电路(PC)板上的所有电阻是否都是并联的？

*3. 识别图 6.61 所示的双面 PC 板上哪几组电阻是并联的？



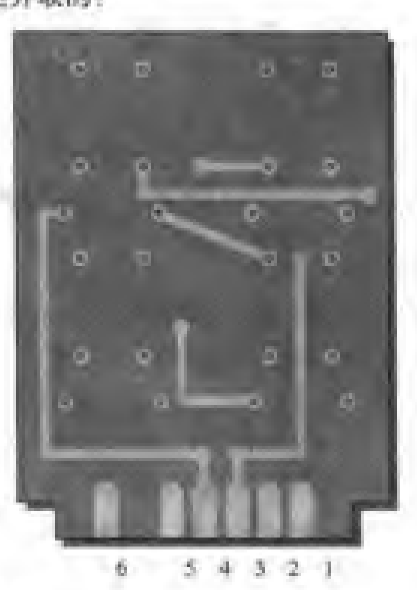


图 6.61

6.2 节　并联电路的电压

4. 已知总电压是 12 V，4 个等阻值电阻的总电阻是 550 Ω，求通过每个并联电阻的电流和电压各是多少？
5. 图 6.62 所示的电压源是 100 V，每个伏特表的读数是多少？
6. 如图 6.63 所示，求开关在每个位置时每个电阻上的电压是多少？

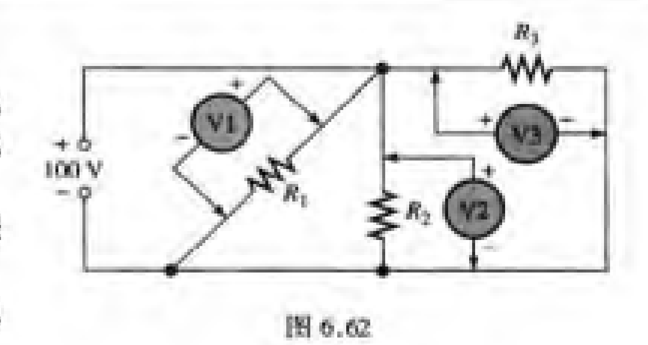


图 6.62

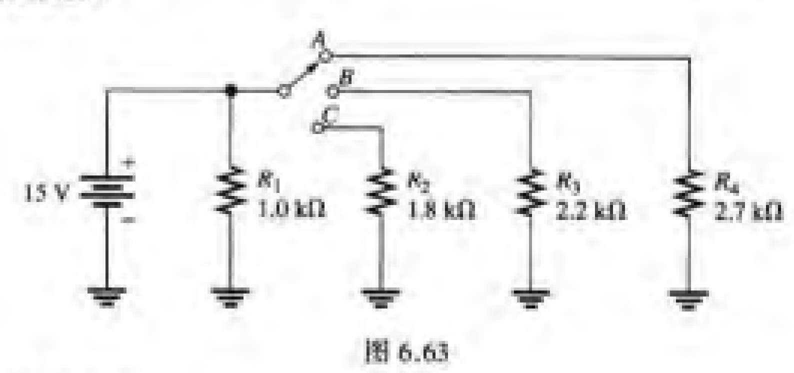


图 6.63

6.3 节　基尔霍夫电流定律

7. 在 3 条支路并联电路中，已测得同方向上的电流分别是 250 mA，300 mA 和 800 mA，那么流入这 3 条支路节点的电流值是多少？
8. 已知 500 mA 的总电流分别流入 5 个并联的电阻。流过其中 4 个电阻的电流分别是 50 mA，150 mA，25 mA 和 100 mA，那么流过第 5 个电阻的电流是多少？
9. 已知如图 6.64 所示，求电阻 R_2，R_3 和 R_4 的阻值是多少？

*10. 已知一个房间中的电子电路包含 1 个 1.25 A 的吊灯和 4 个壁式插座。其中 2 个插座接着 2 个各有 0.833 A 的台灯，第 3 个插座接着 1 A 的电视机。如果这些电器同时使用，房间的主线电流将是多少？如果保护电路的开关限流值是 5 A，那么第 4 个插座的电流最大是多少？画出布线的原理图。

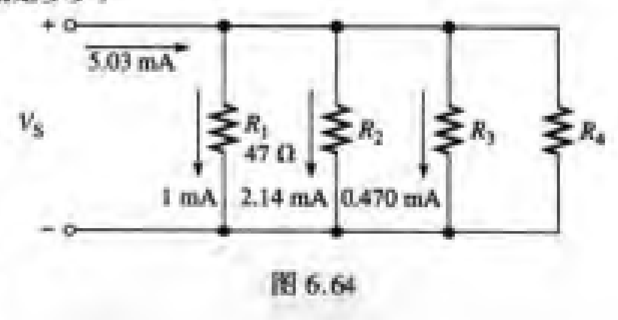


图 6.64

并联电路的总电阻是 25 Ω。已知总电流是 100 mA，那么并联电路中流过一个 220 Ω 电阻的电流是多少？

6.4 节　并联电路的总电阻

12. 并联电路中的电阻阻值分别是 1.0 MΩ，2.2 MΩ，5.6 MΩ，12 MΩ 和 22 MΩ，那么总电阻是多少？
13. 求下列各组电阻并联的总电阻：

    (a) 560 Ω 和 1000 Ω　　(b) 47 Ω 和 56 Ω

    (c) 1.5 kΩ，2.2 kΩ 和 10 kΩ　　(d) 1.0 MΩ，470 kΩ，1.0 kΩ 和 2.7 MΩ
14. 如图 6.65 所示，求各电路中的总电阻 R_T 是多少？
15. 已知 2 个 6.8 kΩ 的电阻并联，求总电阻是多少？
16. 已知 5 个 47 Ω，10 个 100 Ω 和 2 个 10 Ω 的电阻全部都是并联连接，那么 3 组电阻各自的总电阻是多少？
17. 习题 16 中，整个电路的总电阻是多少？

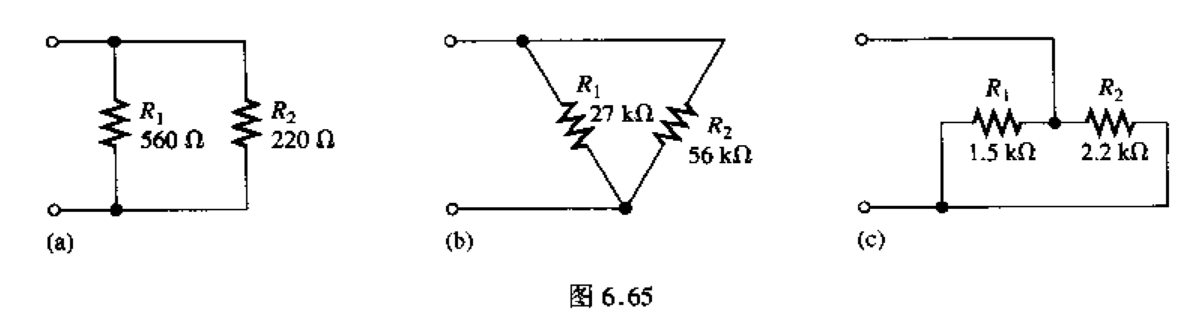


图 6.65

18. 图 6.66 所示的电路中，总电阻是 389.2 Ω，那么 R_2 的阻值是多少？

19. 电路如图 6.67 所示，在以下各种情况中，点 A 到地的总电阻是多少？

(a) SW1 和 SW2 断开　　(b) SW1 闭合，SW2 断开

(c) SW1 断开，SW2 闭合　　(d) SW1 和 SW2 闭合

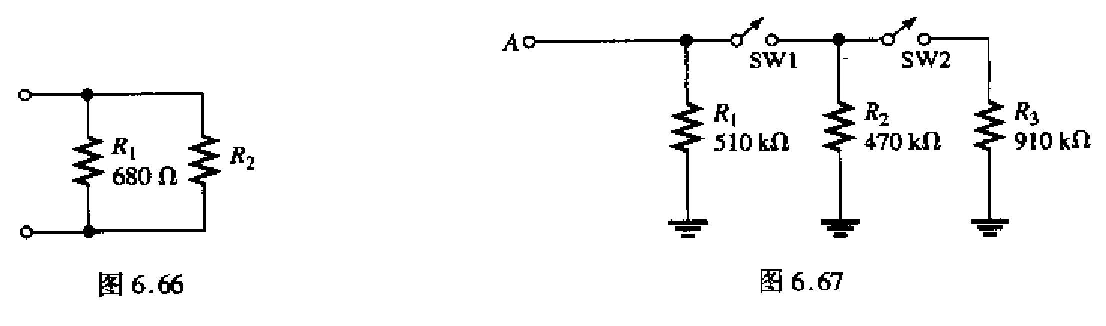


图 6.66　　图 6.67

6.5 节　并联电路中的欧姆定律

20. 电路如图 6.68 所示，求各电路中的总电流是多少？

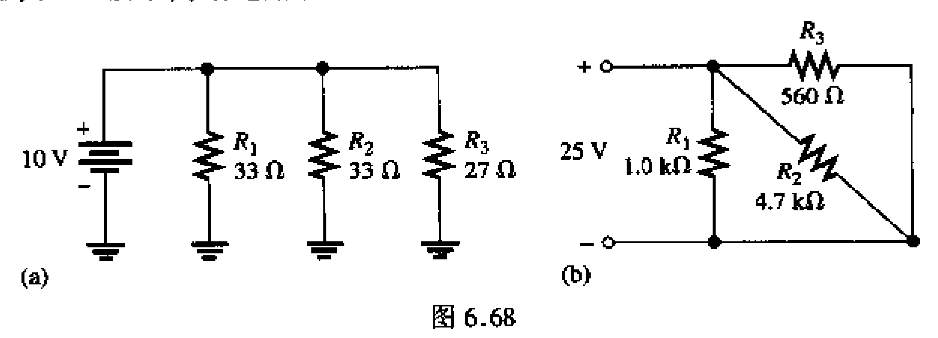


图 6.68

21. 已知 3 个 33 Ω 的电阻和 1 个 110 V 的电源并联，那么电源的电流是多少？

22. 已知 4 个等阻值的电阻并联。并联电路上的电压是 5 V，测得电源的电流是 1.11 mA，那么每个电阻的阻值是多少？

23. 圣诞树上的灯通常都是并联的。如果一组灯连接一个110 V 的电源，每个灯泡中灯丝的电阻都是 2.2 kΩ，那么通过每盏灯的电流是多少？为什么这些灯并联比串联好？

24. 图 6.69 所示的 2 个电路中，求每个未知的标示值的大小是多少。

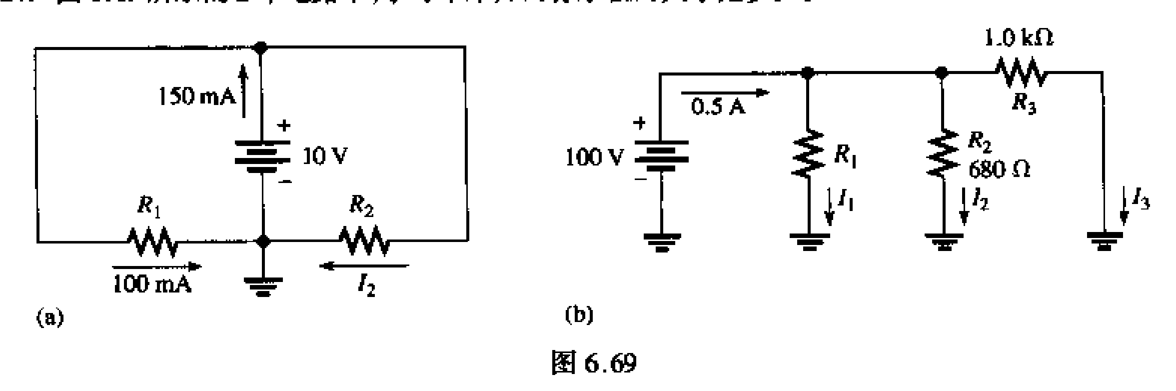


图 6.69

25. 如图 6.70 所示，在 0.5 A 的保险丝烧断之前，100 Ω 的可变电阻器最小可以调到多少？

26. 每个开关的位置如图 6.71 所示，求电源的总电流和通过每个电阻的电流分别是多少？

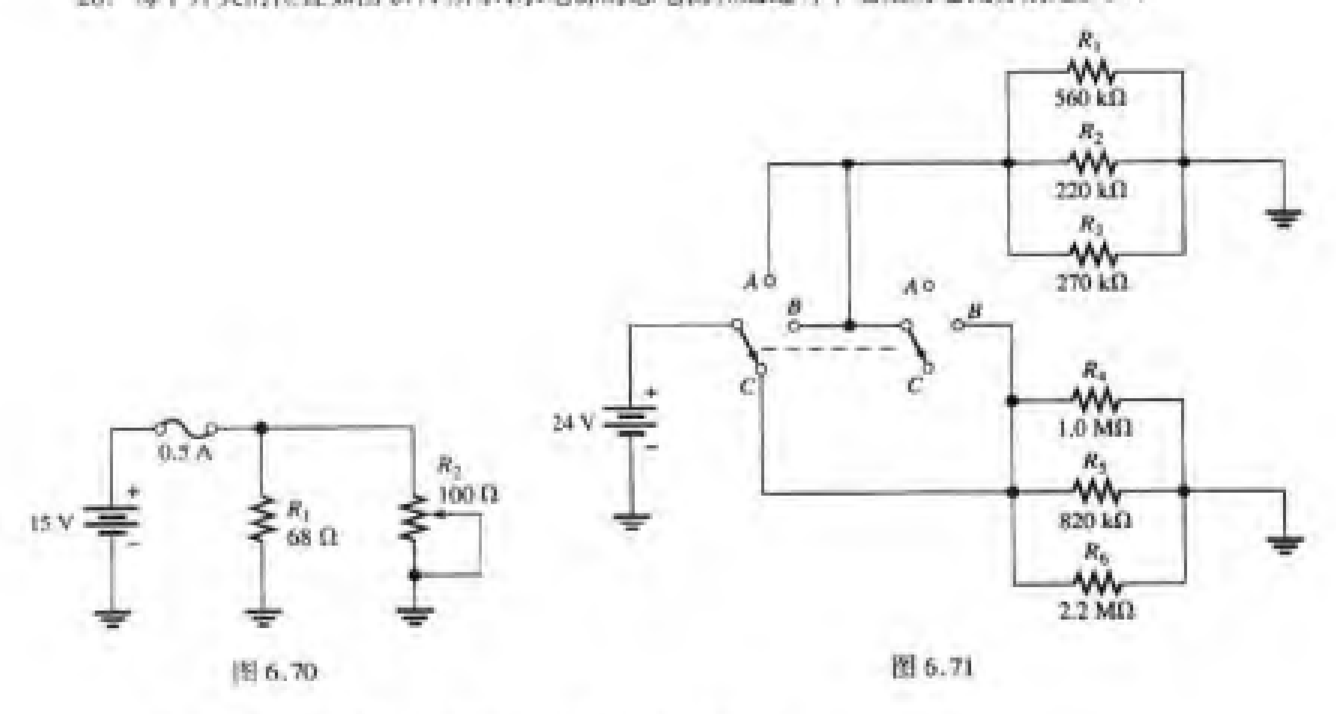


图 6.70

图 6.71

27. 图 6.72 所示的电路中，每个未知标示值的大小是多少。

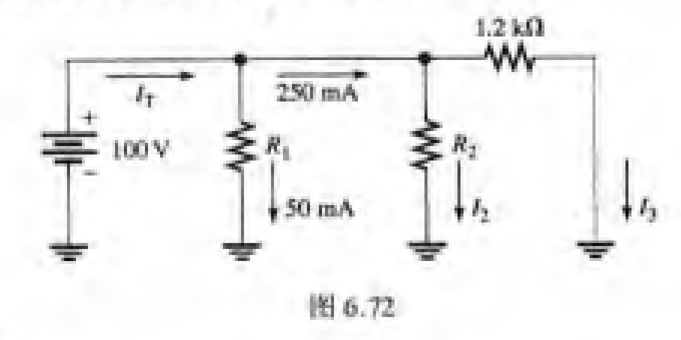


图 6.72

6.6 节 并联的电流源

28. 图 6.73 所示的 3 个电路中，流过 R_L 的电流各是多少？

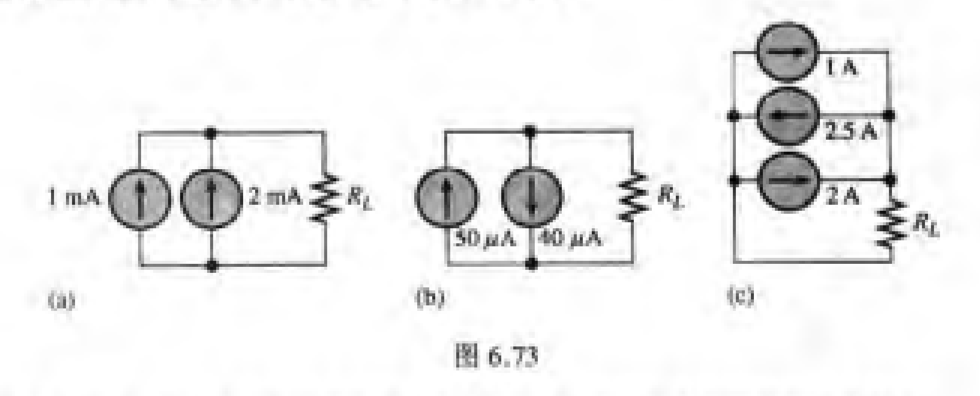


图 6.73

29. 如图 6.74 所示，求双刀双掷开关触臂在各个位置时，通过每个电阻的电流是多少？

6.7 节 分流器

30. 如图 6.75 所示，每个安培表所指示的支路电流是多少？

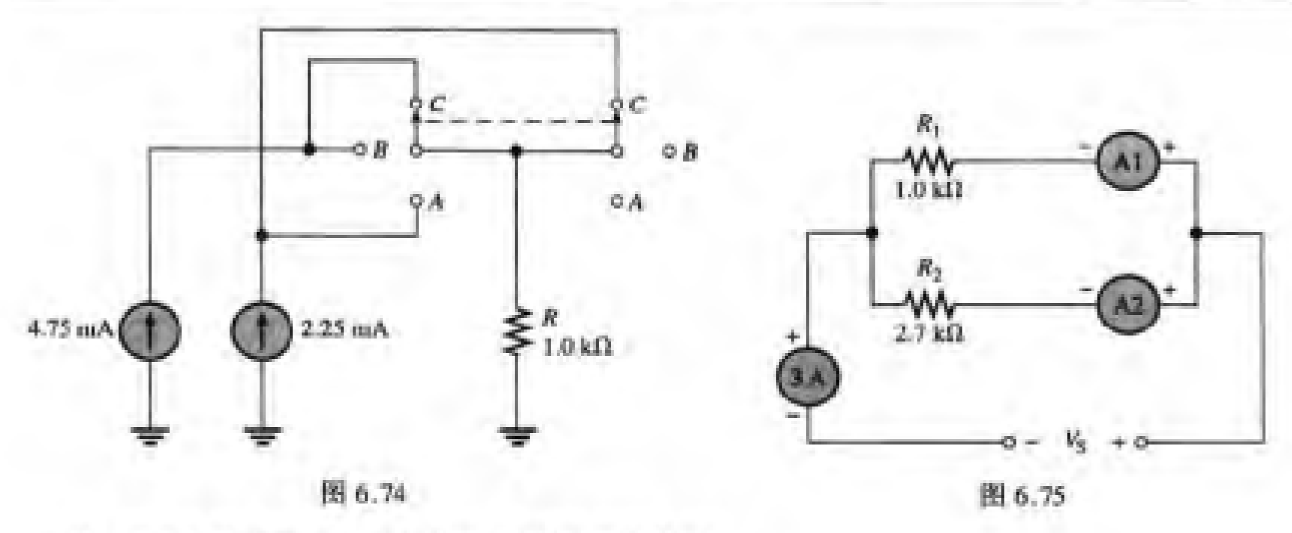


图 6.74　　　　图 6.75

31. 如图 6.76 所示，分流器每条支路中的电流是多少？

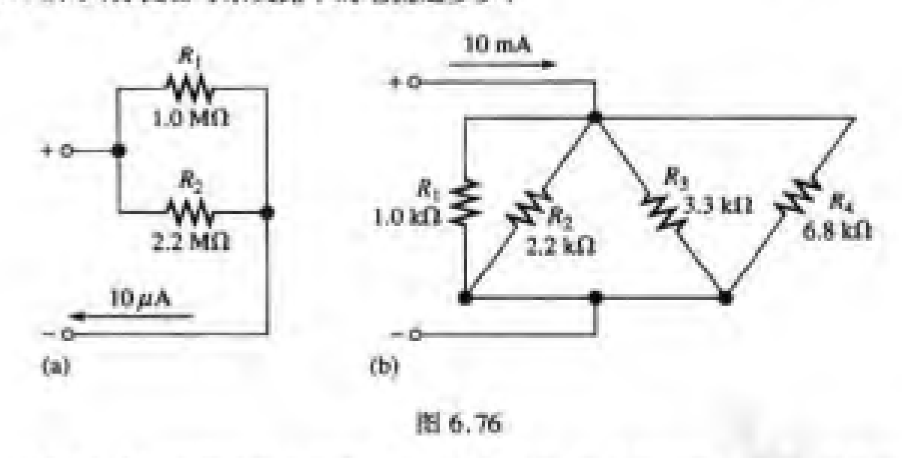


图 6.76

32. 如图 6.77 所示，求流过每个电阻的电流是多少？其中，R 为单位阻值电阻，其他标示的电阻都是 R 的倍数。

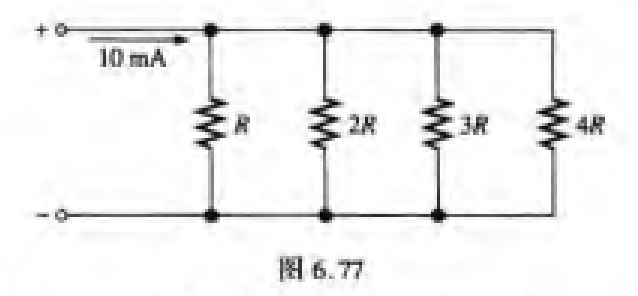


图 6.77

33. 如图 6.78 所示，已知 $R_T = 773\ \Omega$，求电路中每个电阻的阻值是多少？

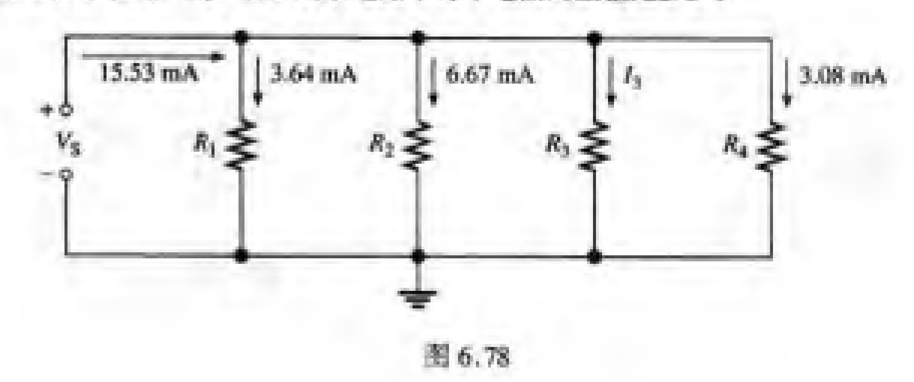


图 6.78

*34. (a)如图 6.49 所示，已知偏转表的电阻是 50 Ω，那么安培表中所需要的旁路电阻(R_{SH})的阻值是多少？

(b)如图 6.50 所示，已知 $R_M = 50\ \Omega$，求电表电路中所需的旁路电阻(R_{SH})的阻值是多少？

*35. 在图 6.50 中的电流表中加入第四量程的位置，用以测量 1 A(100 mA)的电流，那么增加的旁路电阻的阻值是多少？假设这是满偏值为 1 mA，内阻为 50 Ω 的偏转表。

6.8 节　并联电路中的功率

36. 已知 5 个电阻并联，每个消耗的功率是 40 mW，那么总功率是多少？

37. 如图 6.76 所示，求每个电路的总功率是多少？

38. 已知 6 个灯泡通过 110 V 的电源并联，每个灯泡的额定功率是 75 W。每个灯泡的电流是多少？总电流是多少？

*39. 电路如图 6.79 所示，求未知标示值的大小是多少？

*40. 某并联电路只由 1/2 W 的电阻构成，总电阻是 1.0 kΩ，总电流是 50 mA。如果每个电阻消耗的功率是其最大功率的一半，求下列值：

(a) 电阻的数目　　(b) 每个电阻的阻值

(c) 每条支路的电流　　(d) 所加的电压

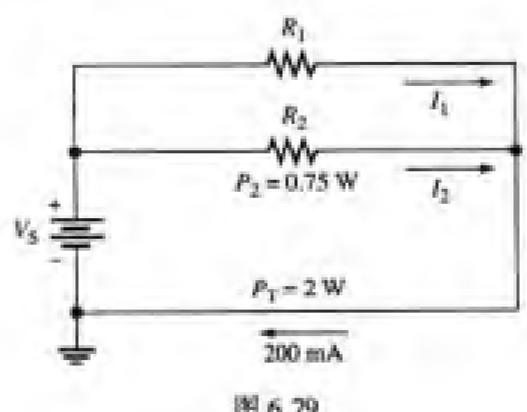


图 6.79

6.10 节　故障检修

41. 若习题 38 中有一个灯泡烧毁，那么通过其余灯泡的电流是多少？总电流是多少？

42. 如图 6.80 所示，测得的电流和电压已标出来，判断是否有一个电阻开路？如果有，是哪一个？

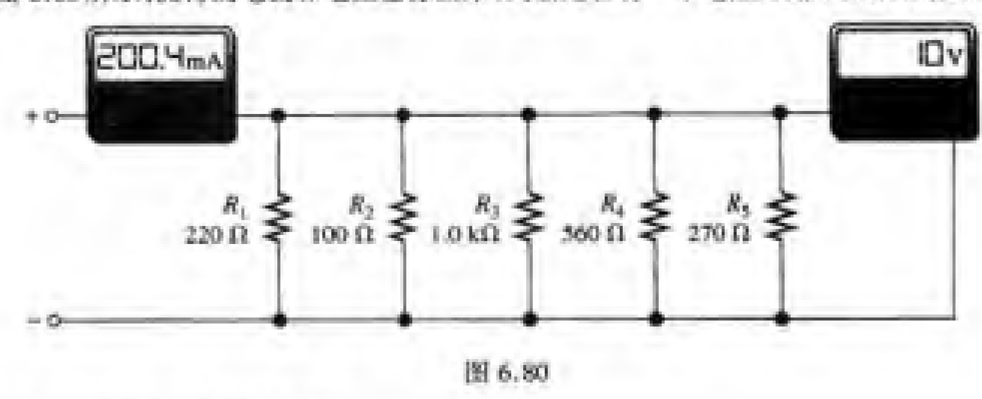


图 6.80

43. 图 6.81 所示的电路中有何故障？

44. 如图 6.81 所示，若电流表的读数是 5.55 mA，那么电路有何故障？

*45. 设计一个测试方案检查图 6.82 所示的电路板，确定没有开路。不能把测试点移出电路板。列出每个详细的步骤。

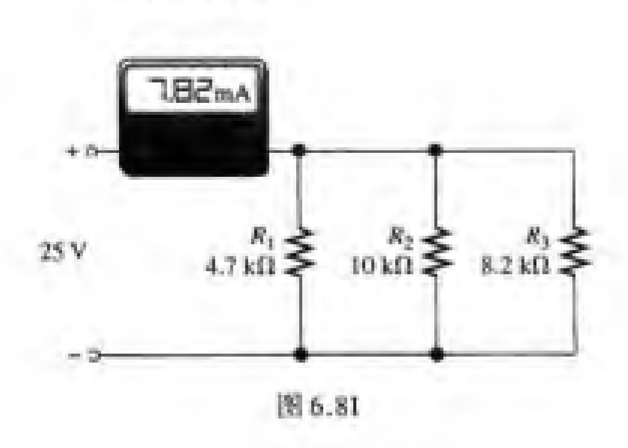


图 6.81

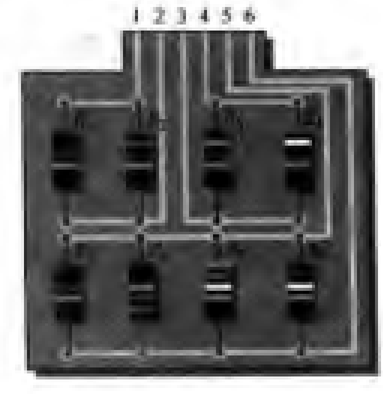


图 6.82

*46. 图 6.83 所示的电路板中，如果引线 2 和引线 4 短路，求以下各引线之间的电阻是多少？

(a) 1 和 2　(b) 2 和 3　(c) 3 和 4　(d) 1 和 4

*47. 图 6.83 所示的电路板中，如果引线 3 和引线 4 短路，求以下各引线之间的电阻是多少？

(a) 1 和 2　(b) 2 和 3　(c) 2 和 4　(d) 1 和 4

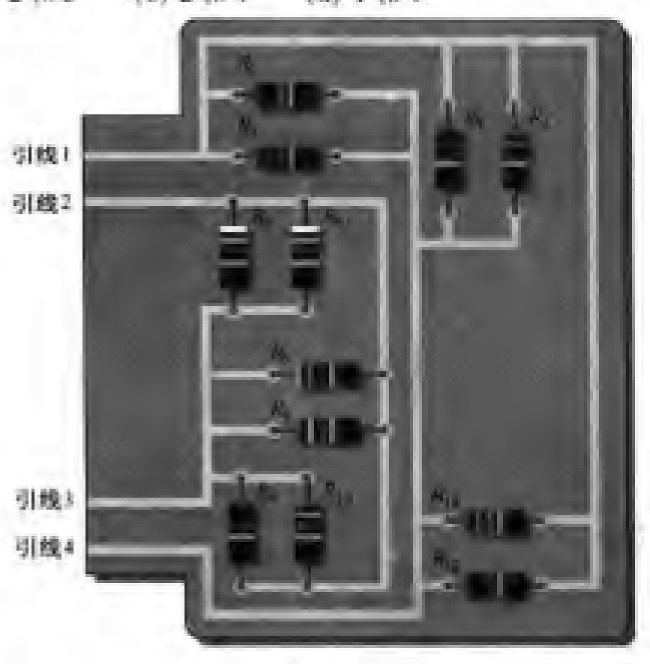


图 6.83

EWB/Multisim 故障检修

这些问题要求阅读本书附带的 EWB/Multisim 的光盘。

48. 打开文件 P06.48，测量并联总电阻是多少？

49. 打开文件 P06.49，通过测量，判断是否有电阻开路。如果有，是哪一个？

50. 打开文件 P06.50，求未知电阻的阻值是多少？

51. 打开文件 P06.51，求未知的电源电压是多少？

52. 打开文件 P06.52，如果有故障，试着找出。

答案

6.1 节　并联的电阻

1. 并联电阻连接在两个相同的独立点上。
2. 并联电路在给定的两点之间有一条以上的电流通路。
3. 参见图 6.84。

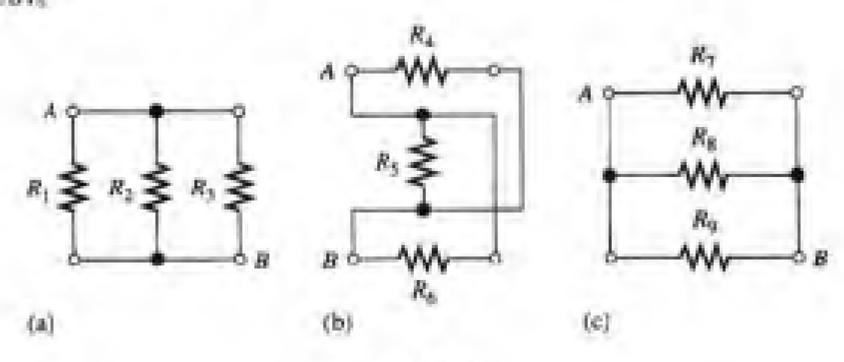


图 6.84

4. 参见图 6.85。

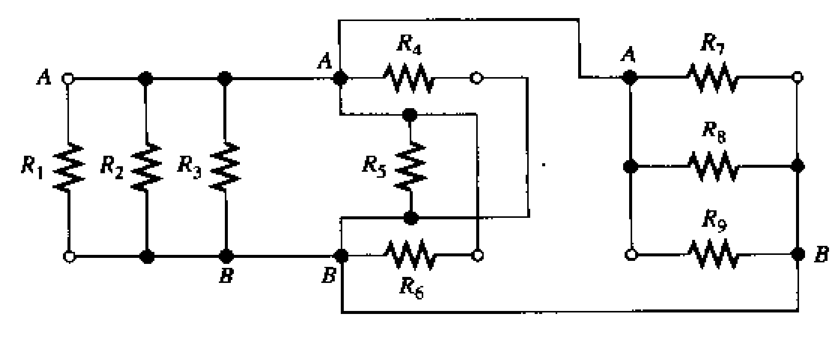


图 6.85

6.2 节 并联电路的电压

1. $V_{10\,\Omega}=V_{22\,\Omega}=5\ \text{V}$
2. $V_{R2}=118\ \text{V}$; $V_S=118\ \text{V}$
3. $V_{R1}=50\ \text{V}$, $V_{R2}=50\ \text{V}$
4. 通过并联支路的电压一样。

6.3 节 基尔霍夫电流定律

1. 基尔霍夫电流定律:节点上所有电流的代数和为零;流进一个节点的电流等于流出该节点的电流。
2. $I_1=I_2=I_3=I_T=2.5\ \text{A}$
3. $I_{OUT}=100\ \text{mA}+300\ \text{mA}=400\ \text{mA}$
4. $I_1=I_T-I_2=3\ \mu\text{A}$
5. $I_{IN}=8\ \text{A}-1\ \text{A}=7\ \text{A}$; $I_{OUT}=8\ \text{A}-3\ \text{A}=5\ \text{A}$

6.4 节 并联电路的总电阻

1. 并联更多的电阻,R_T 减小。
2. 并联总电阻小于支路电阻的最小值。
3. $R_T=\dfrac{1}{(1/R_1)+(1/R_2)+\cdots+(1/R_n)}$
4. $R_T=R_1R_2/(R_1+R_2)$
5. $R_T=R/n$
6. $R_T=(1.0\ \text{k}\Omega)(2.2\ \text{k}\Omega)/3.2\ \text{k}\Omega=688\ \Omega$
7. $R_T=1.0\ \text{k}\Omega/4=250\ \Omega$
8. $R_T=\dfrac{1}{1/47\ \Omega+1/150\ \Omega+1/100\ \Omega}=26.4\ \Omega$

6.5 节 并联电路中的欧姆定律

1. $I_T=10\ \text{V}/22.7\ \Omega=441\ \text{mA}$
2. $V_S=(2\ \text{A})(222\ \Omega)=444\ \text{V}$
3. $I_1=444\ \text{V}/680\ \Omega=653\ \text{mA}$; $I_2=444\ \text{V}/330\ \Omega=1.35\ \text{A}$
4. $R_T=12\ \text{V}/5.85\ \text{mA}=2.05\ \text{k}\Omega$; $R=(2.05\ \text{k}\Omega)(4)=8.2\ \text{k}\Omega$
5. $V=(100\ \text{mA})(680\ \Omega)=68.8\ \text{V}$

6.6 节 并联的电流源

1. $I_T=4(0.5\ \text{A})=2\ \text{A}$

2. 3 个电源，参见图 6.86。

3. $I_{R_E}=10\ \text{mA}+10\ \text{mA}=20\ \text{mA}$

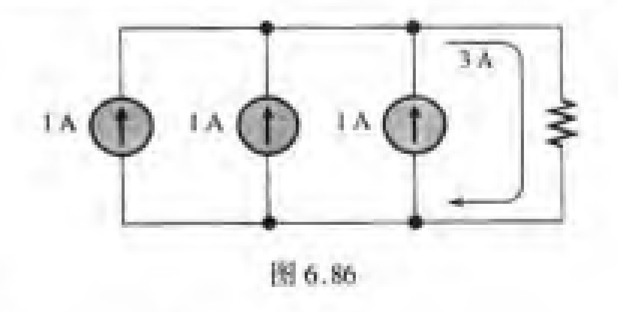


图 6.86

6.7 节 分流器

1. $I_1=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)I_T \qquad I_2=\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)I_T$

2. $I_x=(R_T/R_x)I_T$

3. 22 Ω 电阻的电流最大，220 Ω 电阻的电流最小。

4. $I_1=(680\ \Omega/1010\ \Omega)10\ \text{mA}=6.73\ \text{mA}$；$I_2=(330\ \Omega/1010\ \Omega)10\ \text{mA}=3.27\ \text{mA}$

5. $I_3=(114\ \Omega/470\ \Omega)4\ \text{mA}=970\ \mu\text{A}$

6.8 节 并联电路中的功率

1. 每个电阻的功率相加得到总功率。

2. $P_T=2.38\ \text{W}+5.12\ \text{W}+1.09\ \text{W}+8.76\ \text{W}=17.4\ \text{W}$

3. $P_T=(1\ \text{A})^2(615\ \Omega)=615\ \text{W}$

6.9 节 并联电路应用实例

1. $R_{mm}=50\ \Omega$；$I_{mm}=1\ \text{mA}$

2. R_{SH}小于 R_M，因为通过旁路电阻的电流远大于通过偏转表的电流。

6.10 节 故障检修

1. 若支路开路，电压没有变化，总电流减小。

2. 如果支路开路，并联总电阻增加。

3. 其余的灯依然亮着。

4. 其他支路的电流是 1 A。

5. 电流是 1.2 A 的支路开路。

技术实践

1. 1 mA 的位置上，$R_T=50\ \Omega$；5 mA 的位置上，$R_T=9.94\ \Omega$；10 mA 的位置上，$R_T=5.08\ \Omega$。

2. $I=2.5\ \text{mA}$

3. $I_M=0.5\ \text{mA}$；$I_{R1}=2\ \text{mA}$

实例相关练习

6.1 参见图 6.87。

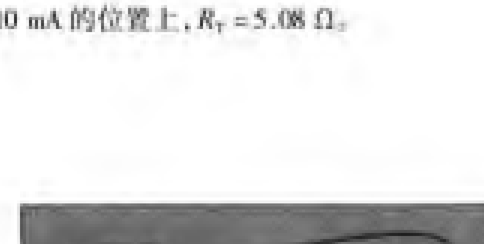


图 6.87

6.2 把引线 1 和引线 2 相连，引线 3 和引线 4 相连。

6.3 25 V

6.4 流入节点 A 和流出节点 B 的是 20 mA。

6.5 $I_T=112\ \text{mA}$；$I_2=50\ \text{mA}$

6.6 2.5 A；5 A

6.7 9.33 Ω

6.8 第九步改为：按下[+]，显示 $100^{-1}+47^{-1}+22^{-1}+$。

第十步改为：输入 33，显示 $100^{-1}+47^{-1}+22^{-1}+33$。

第十一步：按下[2nd][x^{-1}]，显示 $100^{-1}+47^{-1}+22^{-1}+33^{-1}$。

第十二步：按下[ENTER]，显示 $107.034171502\text{E}^{-3}$。

第十三步：按下[2nd][x^{-1}]和[ENTER]，显示 9.34281067406E0。

6.9 132 Ω

6.10 4 Ω

6.11 1044 Ω

6.12 1.83 A;1 A

6.13 I_1 = 20 mA; I_2 = 9.09 mA; I_3 = 35.7 mA; I_4 = 22.0 mA

6.14 1.28 V

6.15 用欧姆表测得 R_T,利用 $R_1 = 1/[(1/R_T) - (1/R_2) - (1/R_3)]$来求 R_1。

6.16 30 mA

6.17 I_1 = 59.4 mA; I_2 = 40.6 mA

6.18 I_1 = 3.27 A; I_2 = 6.73 A

6.19 178 W

6.20 162 W

6.21 0.0347 μA

6.22 15.4 mA

6.23 不正确,R_{10}(68 kΩ)开路。

自测题

1.(b) 2.(c) 3.(b) 4.(d) 5.(a) 6.(c) 7.(c) 8.(c)
9.(d) 10.(b) 11.(a) 12.(d) 13.(c) 14.(b)

故障检修测验

1.(c) 2.(a) 3.(c) 4.(a) 5.(c) 6.(b) 7.(c) 8.(c)
9.(b) 10.(c) 11.(b) 12.(c) 13.(a) 14.(c) 15.(a)

第 7 章　串并联电路

引言

在第 5 章和第 6 章中我们分别介绍了串联电路和并联电路。本章将介绍既有串联电阻也有并联电阻的串并联电路。在很多实际应用中，同一电路中既有串联也有并联电路，所以需要应用已学到的串联和并联电路的分析方法。

本章介绍了许多种重要的串并联电路类型，这些电路包括电阻负载的分压器、梯形网络和惠斯通电桥（Wheatstone bridge）。

分析串并联电路需要用到欧姆定律、基尔霍夫电压和电流定律，以及在前两章学到的求总电阻和总功率的方法。关于负载分压器的内容很重要，因为很多实际电路中都用到了它，例如在以后课程中将学到晶体管放大电路中的分压器偏压电路。梯形网络的应用很广泛，包括数字基础课程中学到的数/模转换器的主要类型。惠斯通电桥在很多系统中用于测量未知的参数。

本章目标

- 识别串并联关系
- 分析串并联电路
- 分析带有电阻负载的分压器
- 确定伏特表的负载效应
- 分析梯形网络
- 分析惠斯通电桥
- 分析串并联电路的故障

主要术语

- 负载
- 分压器电流
- 惠斯通电桥
- 平衡电桥
- 不平衡电桥

技术实践

在技术实践中，我们将测评一个便携电源中的分压器电路板，要求应用本章将介绍的负载分压器知识和前面课程中介绍的技术。在这个应用中，分压器的作用是给三个不同的设备提供参考电压，这三个设备是电路的负载。读者应该在这里学会分析电路板中各种常见的故障。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

7.1　确定串并联关系

串并联电路由串联和并联的电流通路构成。从串联和电路关系的角度确定电路中各部分如何连接是很重要的。

学完本节后读者应该能够：

- 确定串并联关系
- 确定给定电路中的电阻与其他电阻是如何连接的
- 确定 PC 板上的串并联关系

图 7.1(a)所示为一个串并联电阻简单组合的例子。注意从点 A 到点 B 之间的电阻是 R_1，点 B 与点 C 之间是 R_2 和 R_3 的并联($R_2 \parallel R_3$)。如图 7.1(b)所示，点 A 与点 C 之间的电阻是 R_2 和 R_3 的并联组合与 R_1 串联。

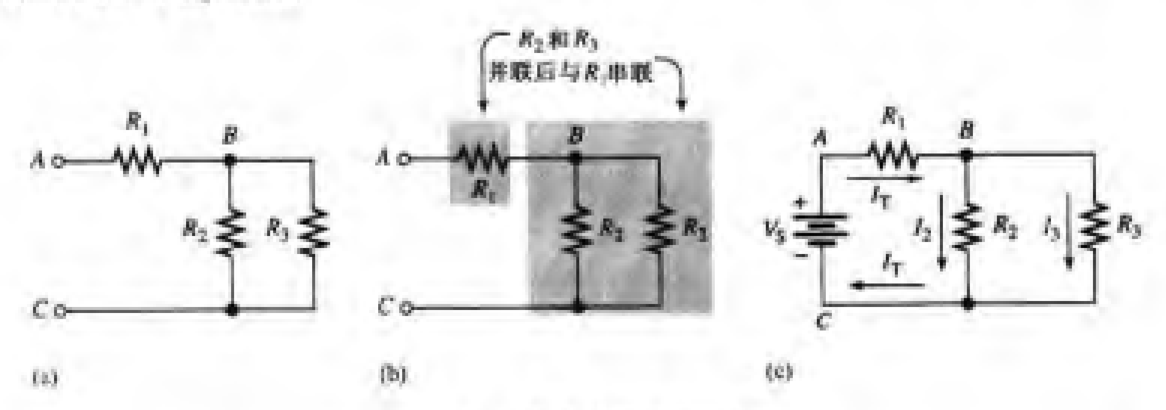


图 7.1 简单的串并联组合

图 7.1(a)所示的电路接上电压源后如图 7.1(c)所示。经过 R_1 的总电流，在点 B 流入两条并行的通路，然后再合并，最后总电流进入电源的负极。

为了举例说明串并联的关系，我们逐步增加图 7.1(a)中电路的复杂程度。在图 7.2(a)中，另一个电阻 R_4 与 R_1 串联接入。此时，点 A 和点 B 之间的电阻是 $R_1 + R_4$，这个串联组合与 R_2 和 R_3 的并联组合再串联，如图 7.2(b)所示。

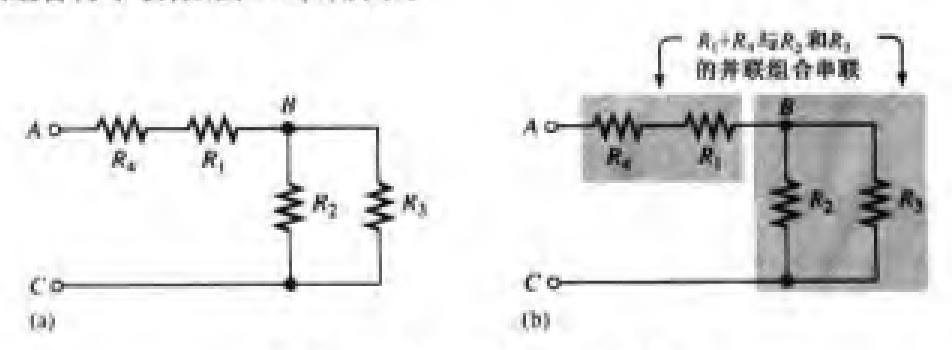


图 7.2 R_4 连入电路，与 R_1 串联

在图 7.3(a)中，R_5 和 R_2 串联。R_2 和 R_5 的串联组合与 R_3 并联，整个串并联组合又与 R_1 和 R_4 的串联组合再串联，如图 7.3(b)所示。

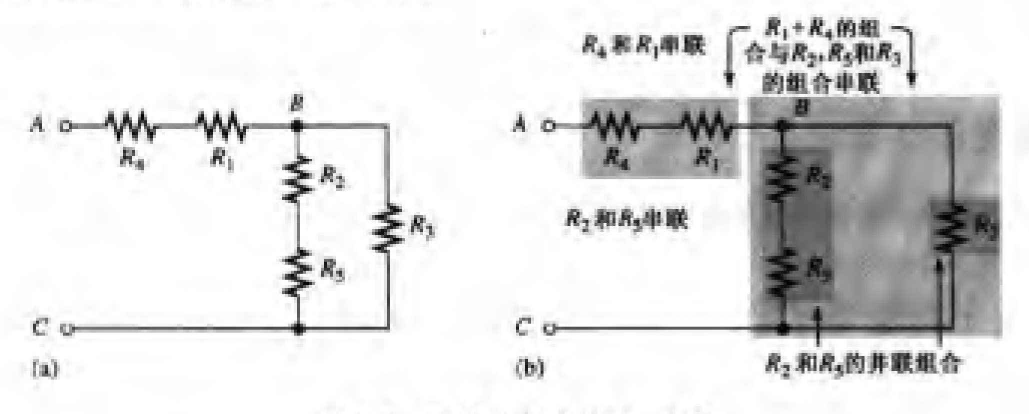


图 7.3 R_5 连入电路，与 R_2 串联

如图7.4(a)所示，R_1 和 R_4 的串联组合与 R_6 并联。R_1、R_4 和 R_6 的串并联组合与 R_2、R_3 和 R_5 的串并联组合串联，如图7.4(b)所示。

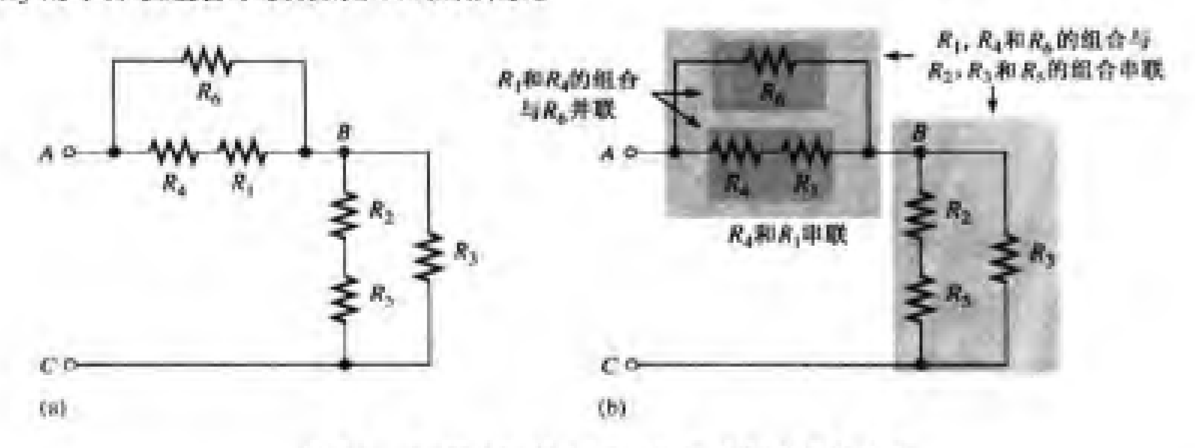


图7.4 R_6 连入电路，与 R_1 和 R_4 的串联组合并联

例7.1 电路如图7.5所示，确定串并联关系。

解：首先从电源的正极沿着电流的通路观察。电源的电流必然经过 R_1，因为 R_1 和电路的其他部分是串联的。

总电流在点 A 分成了两条通路，一部分经过 R_2，另一部分经过 R_3。电阻 R_2 和 R_3 并联，这个并联组合与 R_1 串联。

在点 B，流经 R_2 和 R_3 的电流汇合。因此，总电流经过 R_4。R_2 同 R_3 的并联组合再与 R_4 和 R_1 串联。电流如图7.6所示，I_T 表示总电流。

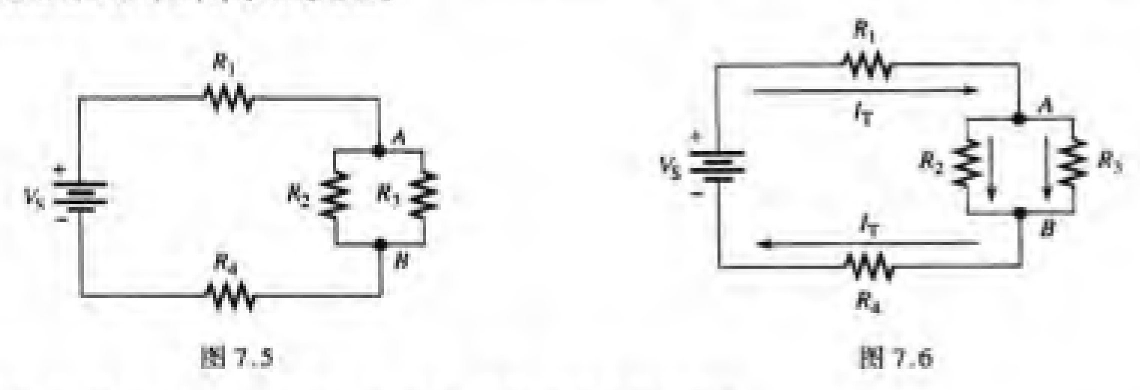


图7.5　　图7.6

总之，R_2 同 R_3 的并联组合再与 R_1 和 R_4 串联，表达式如下所示：

$$R_1 + R_2 \parallel R_3 + R_4$$

练习：如图7.6所示，如果电阻 R_5 连接在点 A 和电源的负极，那么该电阻同其他电阻之间的关系如何？

例7.2 电路如图7.7所示，识别串并联的关系。

解：有时将电路图转换成另一种画法，看起来将会比较简单。在该例中，重画电路原理图如图7.8所示，可以很清楚地看出串并联的关系。现在，可以看到 R_2 和 R_3，R_4 和 R_5 都是互相并联的，这两个并联组合和 R_1 都是串联的，可以表示为如下表达式：

$$R_1 + R_2 \parallel R_3 + R_4 \parallel R_5$$

练习：在图7.8中，如果有一个电阻连接在 R_3 的底端和 R_5 的顶端之间，对电路有何影响？

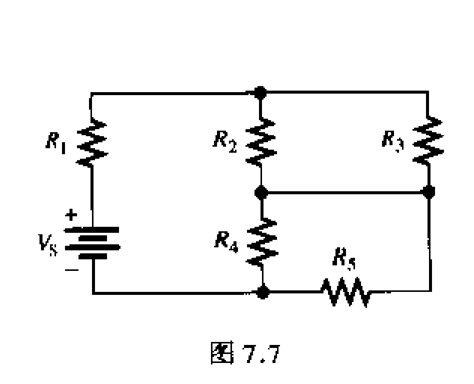


图 7.7

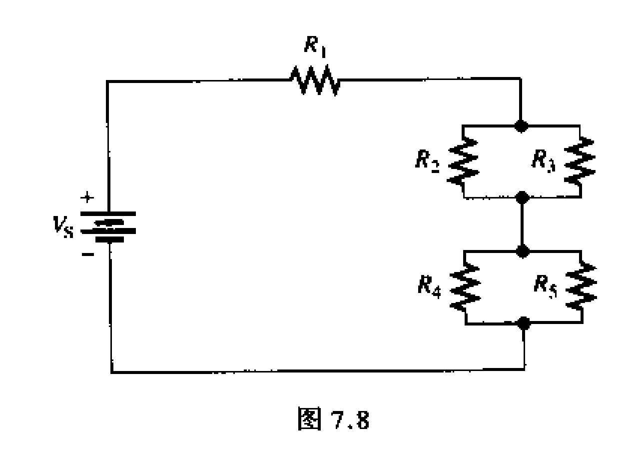


图 7.8

例 7.3 电路如图 7.9 所示，描述点 A 和点 D 之间串并联的组合。

解：在点 B 和点 C 之间有两条并联通路。下面的通路通过 R_4，上面的通路通过 R_2 和 R_3 的串联组合。这个并联组合与 R_5 串联，然后 R_2，R_3，R_4 和 R_5 的组合与 R_6 并联。最后，R_1 与所有其他电阻的组合串联，表达式如下所示：

$$R_1 + R_6 \parallel (R_5 + (R_4 \parallel (R_2 + R_3)))$$

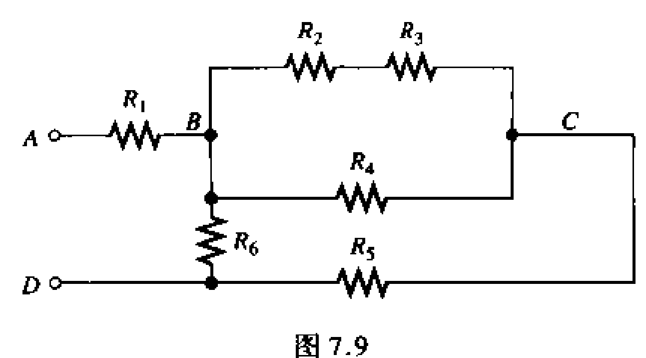


图 7.9

练习：如图 7.9 所示，如果有一个电阻连接在点 C 和点 D 之间，描述它的并联关系。

例 7.4 如图 7.10 所示，描述每两个点之间的总电阻。

解：1. 从点 A 到点 B：R_1 与 R_2 和 R_3 的串联组合并联，表达式如下：

$$R_1 \parallel (R_2 + R_3)$$

2. 从点 A 到点 C：R_3 与 R_1 和 R_2 的串联组合并联，表达式如下：

$$R_3 \parallel (R_1 + R_2)$$

3. 从点 B 到点 C：R_2 与 R_1 和 R_3 的串联组合并联，表达式如下：

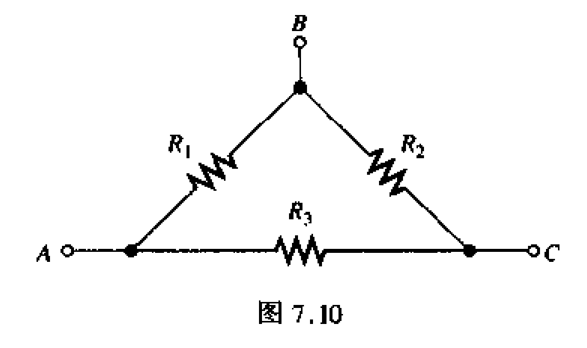


图 7.10

$$R_2 \parallel (R_1 + R_3)$$

练习：如图 7.10 所示，假设原来的电阻都不与地直接相连，如果在点 C 与地之间增加一个电阻 R_4，试着描述每个点和现在的地之间的总电阻是多少？

7.1.1 确定印刷电路(PC)板上的串并联关系

通常 PC 板上元件的物理排列与实际的电路关系没有联系。通过观察 PC 板上的电路，在纸上把元件重新排成可识别的形式，然后就能决定其串并联关系。下面通过例 7.5 来说明这一点。

例 7.5 如图 7.11 所示，确定 PC 板上电阻的关系。

解：图 7.12(a)所示的原理图中，电阻的排列和板上的排列是相同的。在图 7.12(b)中重排电阻，可以很容易地看出串并联的关系。电阻 R_1 和 R_4 串联；$R_1 + R_4$ 与 R_2 并联；R_5 和 R_6 并联，并且其组合与 R_3 串联；R_3，R_5 和 R_6 的串并联组合与 R_2 和 $R_1 + R_4$ 组合并联；整个串并联组合又与 R_7 串联。图 7.12(c)

说明了这些关系，用公式表示如下：



$$R_{AB} = (((R_5 \parallel R_6 + R_3) \parallel R_2) \parallel (R_1 + R_4)) + R_7$$

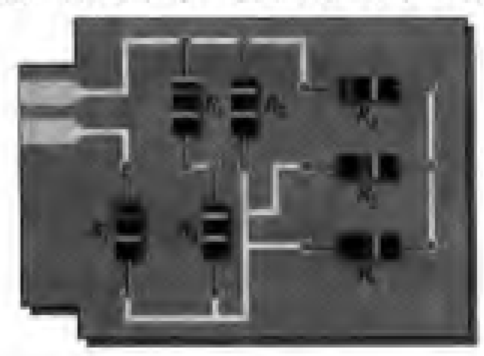
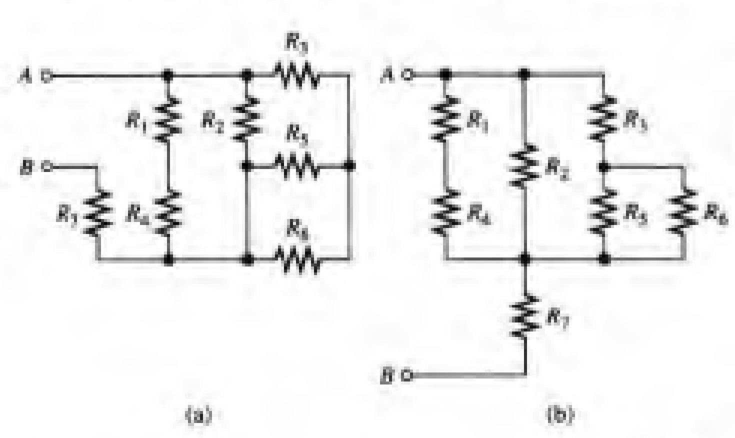


图 7.11

练习：如果 R_2 移出电路，那么 R_3 和 R_6 的关系如何？



(a)　(b)　(c)

图 7.12

7.1 节练习

1. 定义串并联电阻电路。
2. 已知一个串并联电路的描述如下：R_1 和 R_2 并联，这个并联组合与另外一个并联组合 R_3 和 R_4 串联，画出这幅电路图。
3. 电路如图 7.13 所示，描述电阻的串并联关系。
4. 电路如图 7.14 所示，哪些电阻是并联的？
5. 电路如图 7.15 所示，描述并联元件。
6. 电路如图 7.15 所示，是否是并联组合的串联？

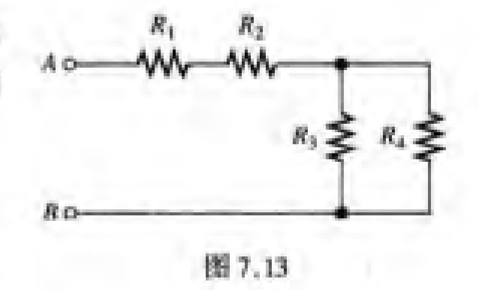


图 7.13

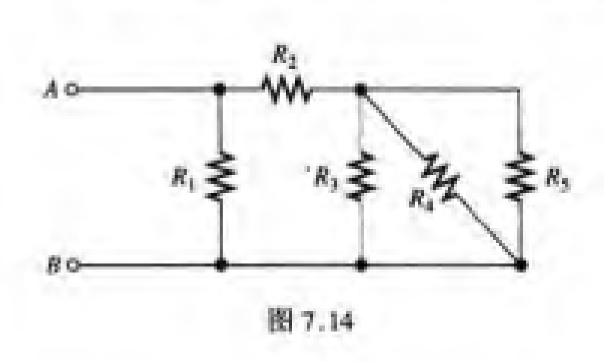


图 7.14

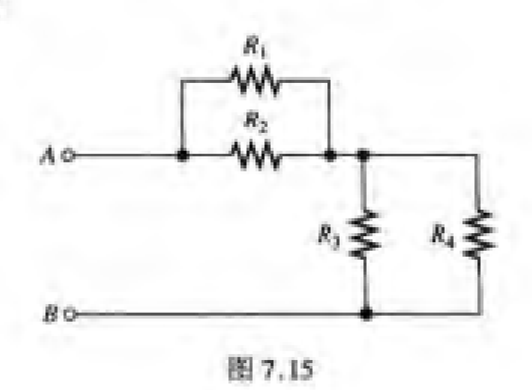


图 7.15

7.2 串并联电路分析

电阻串并联结构的电路中,有些量是很重要的。
学完本节后读者应该能够:

- 分析串并联电路
- 确定总电阻
- 确定总电流
- 确定总电压降

7.2.1 总电阻

第5章和第6章分别介绍了如何确定串联总电阻和并联总电阻。为了得到串并联组合的总电阻(R_T),首先简化串并联关系,然后运用以前学到的计算方法。下面的两个例子说明了求总电阻的一般方法。

例7.6 图7.16所示的电路中,点A和点B之间的总电阻(R_T)是多少?

解:首先求得并联电阻R_2和R_3之间的等效电阻。因为R_2和R_3的阻值相同,可以用式(6.6)计算得到:

$$R_{2\parallel3}=\frac{R}{n}=\frac{100\ \Omega}{2}=50\ \Omega$$

注意,用$R_{2\parallel3}$表示电路总电阻的一部分,先得其从整个电路的总电阻(R_T)中分割出来。

因为R_1和$R_{2\parallel3}$串联,所以得到的总电阻如下所示:

$$R_T=R_1+R_{2\parallel3}=10\ \Omega+50\ \Omega=\mathbf{60\ \Omega}$$

练习:如图7.16所示,若电阻R_3变为82 Ω,那么总电阻是多少?

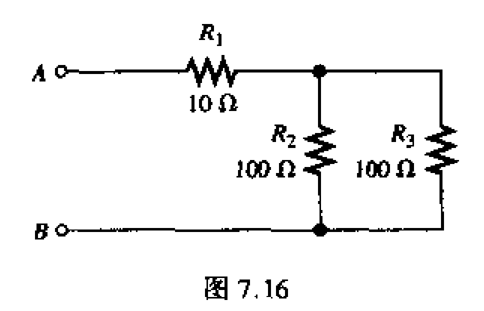


图7.16

例7.7 如图7.17所示,求电源正极与负极之间的总电阻是多少?

解:在上面的支路中R_2和R_3串联,将这个串联组合表示为R_{2+3},等效于R_2+R_3:

$$R_{2+3}=R_2+R_3=47\ \Omega+47\ \Omega=94\ \Omega$$

在下面的支路中R_4和R_5互相并联,我们将这个并联组合表示为$R_{4\parallel5}$:

$$R_{4\parallel5}=\frac{R_4R_5}{R_4+R_5}=\frac{(68\ \Omega)(39\ \Omega)}{68\ \Omega+39\ \Omega}=24.8\ \Omega$$

同时,在下面的支路中R_4和R_5的并联组合与R_6串联,这个串并联组合表示为$R_{4\parallel5+6}$:

$$R_{4\parallel5+6}=R_6+R_{4\parallel5}=75\ \Omega+24.8\ \Omega=99.8\ \Omega$$

图7.18是原始电路图的等价示意图。

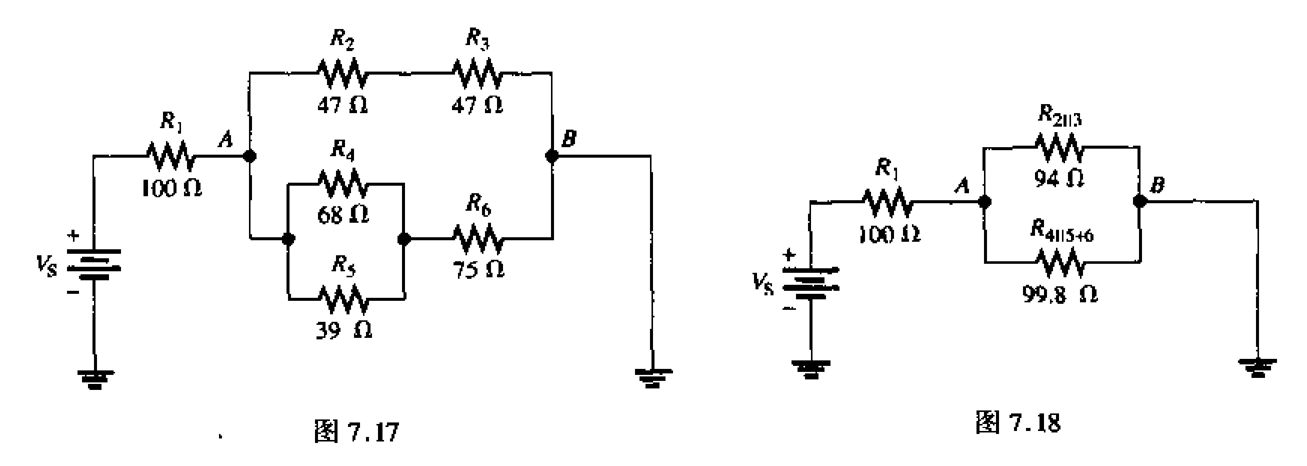


图 7.17　　图 7.18

现在可以发现点 A 和点 B 之间的等价电阻，即 $R_{2\|3}$ 与 $R_{4\|5+6}$ 并联。通过计算，得到等价电阻为：

$$R_{AB}=\frac{1}{\frac{1}{R_{2\|3}}+\frac{1}{R_{4\|5+6}}}=\frac{1}{\frac{1}{94\ \Omega}+\frac{1}{99.8\ \Omega}}=48.4\ \Omega$$

最后，总电阻是 R_1 和 R_{AB} 的串联电阻：

$$R_T=R_1+R_{AB}=100\ \Omega+48.4\ \Omega=\mathbf{148.4\ \Omega}$$

练习：电路如图 7.17 所示，如果在点 A 和点 B 之间增加一个 68 Ω 的并联电阻，则总电阻 R_T 是多少？

7.2.2 总电流

如果已知总电阻和总电压，通过欧姆定律可以得到电路中的总电流。总电流等于总电压除以总电阻：

$$I_T=\frac{V_S}{R_T}$$

例如，假设电源电压是 30 V，那么例 7.7(参见图 7.17)中电路的总电流是：

$$I_T=\frac{V_S}{R_T}=\frac{30\ \text{V}}{148.4\ \Omega}=202\ \text{mA}$$

7.2.3 支路电流

结合分流公式、基尔霍夫电流定律和欧姆定律，可以求出串并联电路任何一个支路的电流。有时可以重复应用公式求得一个电流。下面的两个例子说明了解题的步骤。(注意，电流的下标和电阻的下标相匹配。例如，通过 R_1 的电流为 I_1。)

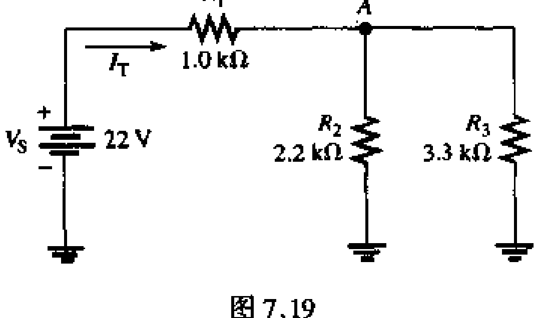


图 7.19

例 7.8 如图 7.19 所示，求通过电阻 R_2 和 R_3 的电流各是多少？

解：首先，需要知道流入并联电路节点(点 A)的电流是多少，这是总电流。要确定 I_T，首先必须知道 R_T：

$$R_T=R_1+\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}=1.0\ \text{k}\Omega+\frac{(2.2\ \text{k}\Omega)(3.3\ \text{k}\Omega)}{2.2\ \text{k}\Omega+3.3\ \text{k}\Omega}=1.0\ \text{k}\Omega+1.32\ \text{k}\Omega=2.32\ \text{k}\Omega$$

$$I_T=\frac{V_S}{R_T}=\frac{22\ \text{V}}{2.32\ \text{k}\Omega}=9.48\ \text{mA}$$

通过第 6 章给出的两支路分流公式，可以得到通过 R_2 的电流：

$$I_2 = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) I_T = \left(\frac{3.3\ \text{k}\Omega}{5.5\ \text{k}\Omega}\right) 9.48\ \text{mA} = \mathbf{5.69\ mA}$$

现在,可以通过基尔霍夫电流定律得到通过 R_3 的电流:

$$I_T = I_2 + I_3$$

$$I_3 = I_T - I_2 = 9.48\ \text{mA} - 5.69\ \text{mA} = \mathbf{3.79\ mA}$$

练习:如图 7.19 所示,一个 4.7 kΩ 的电阻与 R_3 并联,那么通过这个新电阻的电流是多少?

例 7.9 如图 7.20 所示,已知 $V_S = 50$ V,求流过 R_4 的电流是多少?

解:首先,求出通过 R_3 和 R_4 并联节点的电流 I_2。得到这个电流后,便可以利用分流公式得到 I_4。注意电路中有两个主要支路。左边的大支路中只有 R_1,右边的大支路是 R_3 和 R_4 的并联组合再与 R_2 串联。通过两条主要支路的电压是相同的,都是 50 V。计算右边大支路的等效电阻($R_{2+3\|4}$),可以得到通过 R_3 和 R_4 并联节点的电流。然后应用欧姆定律,I_2 是通过该主支路的总电流,因此:

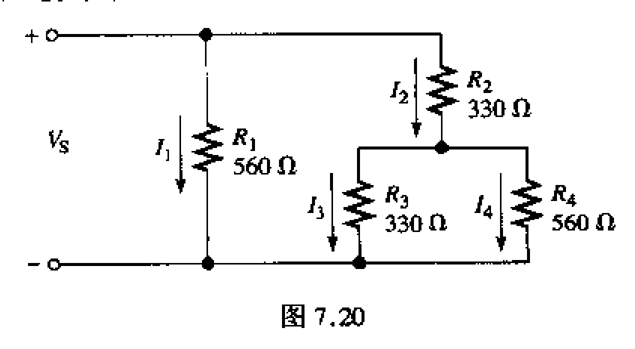


图 7.20

$$R_{2+3\|4} = R_2 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = 330\ \Omega + \frac{(330\ \Omega)(560\ \Omega)}{890\ \Omega} = 538\ \Omega$$

$$I_2 = \frac{V_S}{R_{2+3\|4}} = \frac{50\ \text{V}}{538\ \Omega} = 93\ \text{mA}$$

应用分流公式,可以求得 I_4:

$$I_4 = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4}\right) I_2 = \left(\frac{330\ \Omega}{890\ \Omega}\right) 93\ \text{mA} = \mathbf{34.5\ mA}$$

练习:如图 7.20 所示,如果 $V_S = 20$ V,通过 R_1 和 R_2 的电流各是多少?

7.2.4 电压降

我们经常需要确定某部分串并联电路的电压。利用第 5 章给出的分压公式、基尔霍夫电压定律和欧姆定律,可以求得这些电压。下面的例子给出了这些公式的具体应用。(注意电压的下标和电阻的下标相匹配,例如通过 R_1 上的电压为 V_1。)

例 7.10 如图 7.21 所示,求点 A 到地的电压降是多少? R_1 上的电压 V_1 是多少?

解:注意在电路中 R_2 和 R_3 并联,由于其阻值是相同的,所以从点 A 到地的等效电阻是:

$$R_A = \frac{560\ \Omega}{2} = 280\ \Omega$$

图 7.22 所示的等效电路中 R_1 和 R_A 串联,则从电源看出的电路总电阻是:

$$R_T = R_1 + R_A = 150\ \Omega + 280\ \Omega = 430\ \Omega$$

利用分压公式,可以求得加在图 7.21 中并联组合上的电压是:

$$V_A = \left(\frac{R_A}{R_T}\right) V_S = \left(\frac{280\ \Omega}{430\ \Omega}\right) 80\ \text{V} = \mathbf{52.1\ V}$$

此时,根据基尔霍夫电压定律,可得 V_1:

$$V_S = V_1 + V_A$$

$$V_1 = V_S - V_A = 80\ \text{V} - 52.1\ \text{V} = \mathbf{27.9\ V}$$

练习：如图 7.21 中，如果 R_1 改为 220 Ω，那么 V_A 和 V_1 是多少？

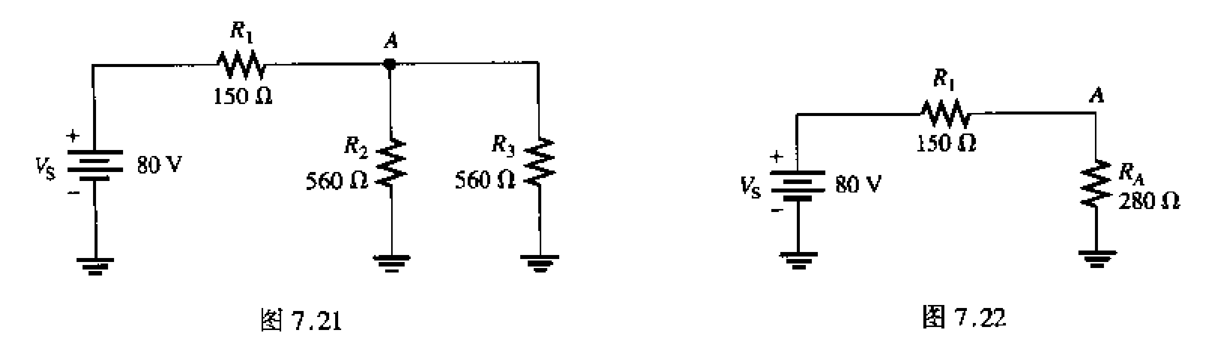


图 7.21　　　　图 7.22

例 7.11　如图 7.23 所示的电路中，求通过每个电阻的电压是多少？

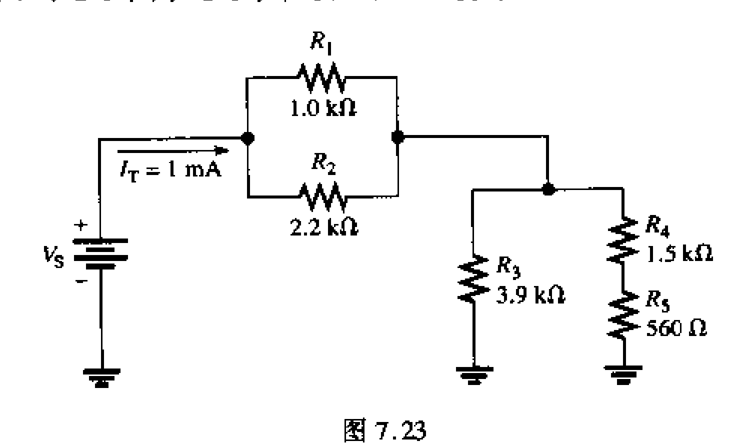


图 7.23

解：电源电压未给定，但从图中可得总电流。R_1 和 R_2 并联，因此其上的电压一样。那么，通过 R_1 的电流是：

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) I_T = \left(\frac{2.2\ \text{k}\Omega}{3.2\ \text{k}\Omega}\right) 1\ \text{mA} = 688\ \mu\text{A}$$

加在 R_1 和 R_2 上的电压是：

$$V_1 = I_1 R_1 = (688\ \mu\text{A})(1.0\ \text{k}\Omega) = \mathbf{688\ mV}$$

$$V_2 = V_1 = \mathbf{688\ mV}$$

根据分流公式可得通过 R_3 的电流是：

$$I_3 = \left(\frac{R_4 + R_5}{R_3 + (R_4 + R_5)}\right) I_T = \left(\frac{2.06\ \text{k}\Omega}{5.96\ \text{k}\Omega}\right) 1\ \text{mA} = 346\ \mu\text{A}$$

加在 R_3 上的电压是：

$$V_3 = I_3 R_3 = (346\ \mu\text{A})(3.9\ \text{k}\Omega) = \mathbf{1.35\ V}$$

R_4 和 R_5 串联，所以通过的电流大小一样，均为：

$$I_4 = I_5 = I_T - I_3 = 1\ \text{mA} - 346\ \mu\text{A} = 654\ \mu\text{A}$$

加在 R_4 和 R_5 上的电压，可以由下式求得：

$$V_4 = I_4 R_4 = (654\ \mu\text{A})(1.5\ \text{k}\Omega) = \mathbf{981\ mV}$$

$$V_5 = I_5 R_5 = (654\ \mu\text{A})(560\ \Omega) = \mathbf{366\ mV}$$

练习：如图 7.23 所示，电路中的电源电压 V_S 是多少？

例 7.12 已知电路如图 7.24 所示,求每个电阻的电压降分别是多少?

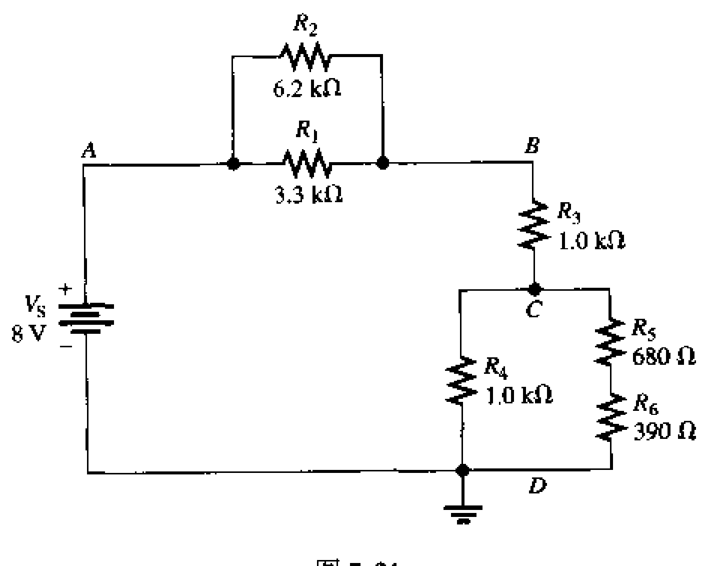


图 7.24

解:已知总电压如图所示,可由分压公式得出每个电阻的电压降。首先将每个并联部分简化为等效电阻。点 A 和点 B 之间 R_1 和 R_2 并联,可得等效电阻:

$$R_{AB}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{(3.3\ \text{k}\Omega)(6.2\ \text{k}\Omega)}{9.5\ \text{k}\Omega}=2.15\ \text{k}\Omega$$

点 C 和点 D 之间,R_4 与 R_5 和 R_6 的串联部分并联,简化得:

$$R_{CD}=\frac{R_4(R_5+R_6)}{R_4+R_5+R_6}=\frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(1.07\ \text{k}\Omega)}{2.07\ \text{k}\Omega}=517\ \text{k}\Omega$$

等效电路如图 7.25 所示,电路总电阻是:

$$R_T=R_{AB}+R_3+R_{CD}=2.15\ \text{k}\Omega+1.0\ \text{k}\Omega+517\ \Omega=3.67\ \text{k}\Omega$$

接着,根据分压器的公式,可得等效电路的电压:

$$V_{AB}=\left(\frac{R_{AB}}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{2.15\ \text{k}\Omega}{3.67\ \text{k}\Omega}\right)8\ \text{V}=4.69\ \text{V}$$

$$V_{CD}=\left(\frac{R_{CD}}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{517\ \text{k}\Omega}{3.67\ \text{k}\Omega}\right)8\ \text{V}=1.13\ \text{V}$$

$$V_3=\left(\frac{R_3}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{1.0\ \text{k}\Omega}{3.67\ \text{k}\Omega}\right)8\ \text{V}=\mathbf{2.18\ V}$$

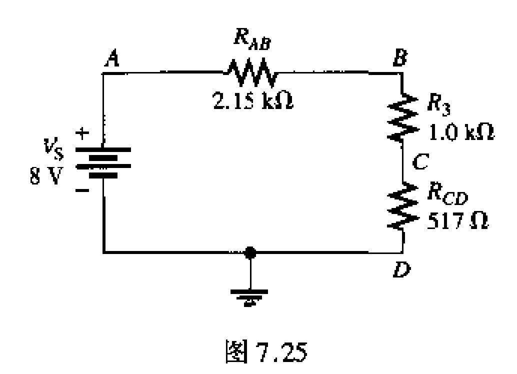


图 7.25

如图 7.24 所示,R_1 和 R_2 上的电压都等于 V_{AB},因此:

$$V_1=V_2=V_{AB}=\mathbf{4.69\ V}$$

R_5 和 R_6 串联部分以及 R_4 上的电压都等于 V_{CD},因此:

$$V_4=V_{CD}=\mathbf{1.13\ V}$$

最后,根据分压器的公式可得 R_5 和 R_6 的电压 V_5 和 V_6:

$$V_5=\left(\frac{R_5}{R_5+R_6}\right)V_{CD}=\left(\frac{680\ \Omega}{1070\ \Omega}\right)1.13\ \text{V}=\mathbf{718\ mV}$$

$$V_6=\left(\frac{R_6}{R_5+R_6}\right)V_{CD}=\left(\frac{390\ \Omega}{1070\ \Omega}\right)1.13\ \text{V}=\mathbf{412\ mV}$$

练习:电路如图 7.24 所示,若移开 R_2,求 V_{AB},V_{BC}和 V_{CD}分别是多少?

通过本节可以看出，串并联电路的分析方法有很多种，取决于所给定的条件和所需要的信息。本节的例题不是最具代表性的，但是提供了一种串并联电路的分析方法。

掌握欧姆定律、基尔霍夫定律、分压公式和分流公式，并会应用这些定律，就能解决大部分电阻电路的分析问题。当然，判断串联和并联部分是最基本的。一些电路，比如不平衡的惠斯通电桥，没有基本的串联和并联部分，对这些情况需要应用另外一些方法，后面将会讨论。

7.2 节练习

1. 列举串并联电路分析可能用到的电路定律和公式。
2. 电路如图 7.26 所示，求电路中点 A 和点 B 之间的总电阻是多少？
3. 电路如图 7.26 所示，求通过 R_3 的电流是多少？
4. 电路如图 7.26 所示，求 R_2 的电压降是多少？
5. 电路如图 7.27 所示，从电源看，R_T 和 I_T 分别是多少？

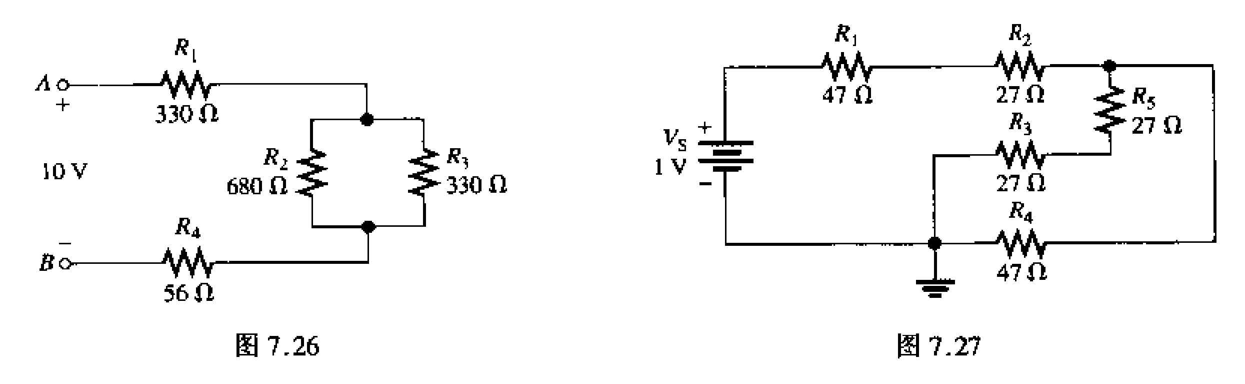


图 7.26　　　　图 7.27

7.3　带有电阻负载的分压器

第 5 章中已经介绍过分压器，本节将介绍分压器电路中电阻负载的作用。

学完本节后读者应该能够：

- 分析分压器的负载
- 判断分压器电路中电阻负载的作用
- 定义分压器电流

如图 7.28(a)所示，因为两个电阻等值，分压器产生一个 5 V 的输出电压(V_{OUT})，该电压是无负载输出电压。若有一个负载电阻 R_L 连接在输出和地之间，如图 7.28(b)所示，则输出电压将减小，减小幅度取决于 R_L 的大小。该负载电阻和 R_2 并联，减少了点 A 到地之间的电阻，因此减少了通过并联部分的电压。这就是分压器负载的一个作用。分压器负载的另一个作用是使电路总电阻减少，从而使通过电源的电流变大。

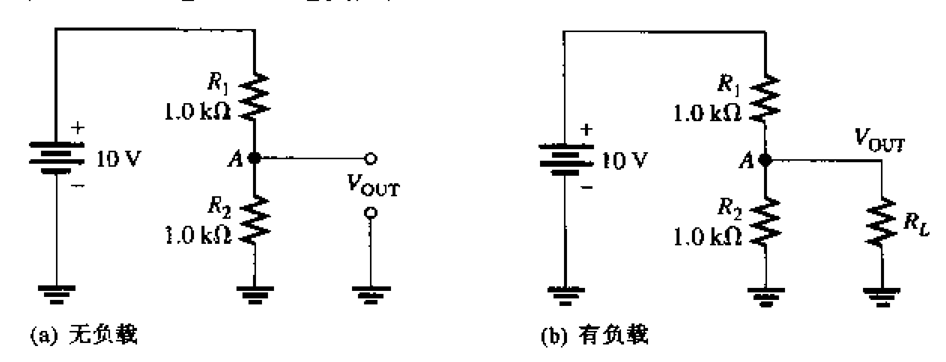
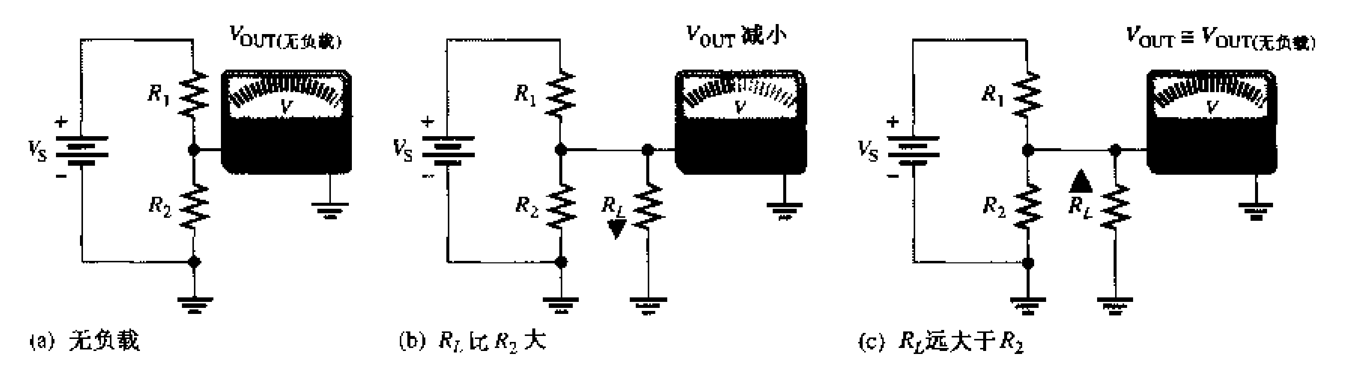


图 7.28　无负载和有负载的分压器输出

由图 7.29 可以看出,负载 R_L 比 R_2 大得越多,输出的电压比无负载的值减小得就越少。若两个电阻并联,其中一个电阻比另一个大得越多,那么总电阻值就越接近小的电阻阻值。



(a) 无负载　(b) R_L 比 R_2 大　(c) R_L 远大于 R_2

图 7.29　负载电阻的作用

例 7.13　(a)如图 7.30 所示,求分压器的无负载输出电压是多少?

(b)如图 7.30 所示,若负载电阻 $R_L = 10\ \text{k}\Omega$, $R_L = 100\ \text{k}\Omega$,分别求分压器的负载输出电压是多少?

解:(a)无负载的电压输出为:

$$V_{OUT(无负载)} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_S = \left(\frac{10\ \text{k}\Omega}{14.7\ \text{k}\Omega}\right) 5\ \text{V} = \mathbf{3.40\ V}$$

图 7.30

(b)负载电阻是 10 kΩ 的 R_L 与 R_2 串联,那么:

$$R_2 \parallel R_L = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{100\ \text{k}\Omega}{20} = 5\ \text{k}\Omega$$

等效电路如图 7.31(a)所示,则负载输出电压是:

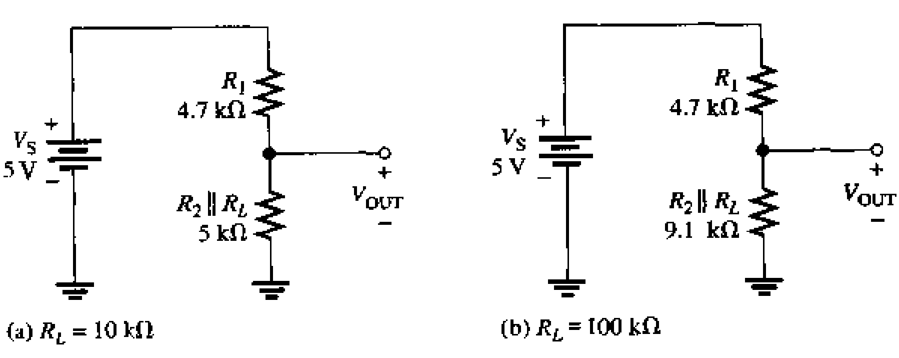
$$V_{OUT(负载)} = \left(\frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + R_2 \parallel R_L}\right) V_S = \left(\frac{5\ \text{k}\Omega}{9.7\ \text{k}\Omega}\right) 5\ \text{V} = \mathbf{2.58\ V}$$

负载电阻 R_L 是 100 kΩ 时,输出对地的电阻是:

$$R_2 \parallel R_L = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{(10\ \text{k}\Omega)(100\ \text{k}\Omega)}{110\ \text{k}\Omega} = 9.1\ \text{k}\Omega$$

等效电路如图 7.31(b)所示,则负载输出电压是:

$$V_{OUT(负载)} = \left(\frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + R_2 \parallel R_L}\right) V_S = \left(\frac{9.1\ \text{k}\Omega}{13.8\ \text{k}\Omega}\right) 5\ \text{V} = \mathbf{3.30\ V}$$



(a) $R_L = 10\ \text{k}\Omega$　(b) $R_L = 100\ \text{k}\Omega$

图 7.31

对于较小阻值的 R_L，V_{OUT}的减少量是：

$$3.40\ \text{V} - 2.58\ \text{V} = 0.82\ \text{V}$$

对于较大阻值的 R_L，V_{OUT}的减少量是：

$$3.40\ \text{V} - 3.30\ \text{V} = 0.10\ \text{V}$$

本例说明了分压器中负载 R_L 的作用。

练习：如图 7.30 所示，如果负载电阻是 1.0 MΩ，求 V_{OUT}是多少？

7.3.1 负载电流和分压器电流

在多触点负载的分压器电路中，电源的总电流是由通过负载电阻的负载电流和分压器电阻的电流构成的。图 7.32 所示的是带有两个电压输出或两个触点的分压器。注意，总电流 I_T 通过 R_1 进入点 A，然后电流分成两路，通过 R_{L1}的 I_{RL1} 和通过 R_2 的 I_2。在点 B，电流 I_2 分成两路，通过 R_{L2}的 I_{RL2}和通过 R_3 的 I_3。电流 I_3 称为分压器电流，在电路中是总电流减去总负载电流剩下的电流。

$$I_{分压器} = I_T - I_{RL1} - I_{RL2} \tag{7.1}$$

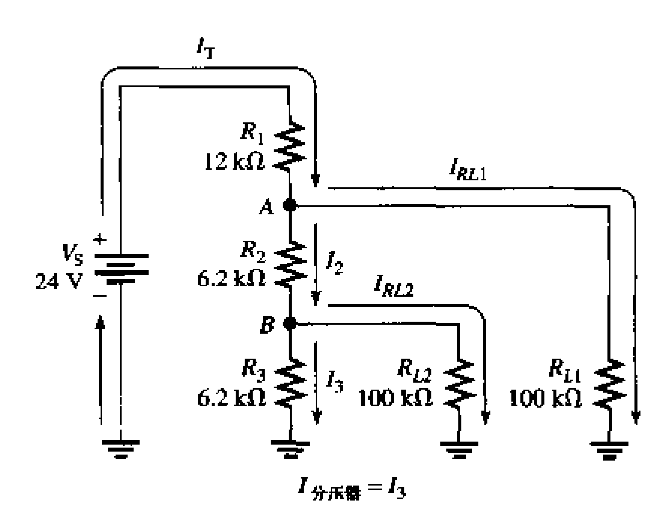


图 7.32　两触点负载分压器的电流

例 7.14　如图 7.32 所示，已知两触点负载分压器，求负载电流 I_{RL1}，I_{RL2}和分压器电流 I_3 分别是多少？

解：点 A 到地的等效电阻是 R_3 和 R_{L2}的并联与 R_2 串联，该组合电路和 100 kΩ 的负载电阻 R_{L1} 并联。先求电阻值，R_3 与 R_{L2}的并联标为 R_B，由图 7.33(a)可得等效电路的电阻：

$$R_B = \frac{R_3 R_{L2}}{R_3 + R_{L2}} = \frac{(6.2\ \text{k}\Omega)(100\ \text{k}\Omega)}{106.2\ \text{k}\Omega} = 5.84\ \text{k}\Omega$$

R_2 与 R_B 的串联标为 R_{2+B}，由图 7.33(b)可得等效电路的电阻为：

$$R_{2+B} = R_2 + R_B = 6.2\ \text{k}\Omega + 5.84\ \text{k}\Omega = 12.0\ \text{k}\Omega$$

R_{L1}与 R_{2+B}的并联标为 R_A，由图 7.33(c)可得等效电路的电阻为：

$$R_A = \frac{R_{L1} R_{2+B}}{R_{L1} + R_{2+B}} = \frac{(100\ \text{k}\Omega)(12.0\ \text{k}\Omega)}{112\ \text{k}\Omega} = 10.7\ \text{k}\Omega$$

R_A 是点 A 对地的总电阻，则电路的总电阻是：

$$R_T = R_A + R_1 = 10.7\ \text{k}\Omega + 12\ \text{k}\Omega = 22.7\ \text{k}\Omega$$

由图 7.33(c)的等效电路可得通过 R_{L1}的电压是：

$$V_{RL1} = V_A = \left(\frac{R_A}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{10.7\ \text{k}\Omega}{22.7\ \text{k}\Omega}\right)24\ \text{V} = 11.3\ \text{V}$$

通过 R_{L1}的负载电流是：

$$I_{RL1} = \frac{V_{RL1}}{R_{L1}} = \left(\frac{11.3\ \text{V}}{100\ \text{k}\Omega}\right) = \mathbf{113\ \mu A}$$

由图 7.33(a)的等效电路和点 A 的电压可得点 B 的电压是：

$$V_B = \left(\frac{R_B}{R_2 + R_B}\right)V_A = \left(\frac{5.84\ \text{k}\Omega}{12.0\ \text{k}\Omega}\right)11.3\ \text{V} = 5.50\ \text{V}$$

通过 R_{L2} 的负载电流是：

$$I_{RL2} = \frac{V_{RL2}}{R_{L2}} = \frac{V_B}{R_{L2}} = \frac{5.50\ \text{V}}{100\ \text{k}\Omega} = \mathbf{55\ \mu A}$$

分压器电流是：

$$I_3 = \frac{V_B}{R_3} = \frac{5.50\ \text{V}}{6.2\ \text{k}\Omega} = \mathbf{887\ \mu A}$$

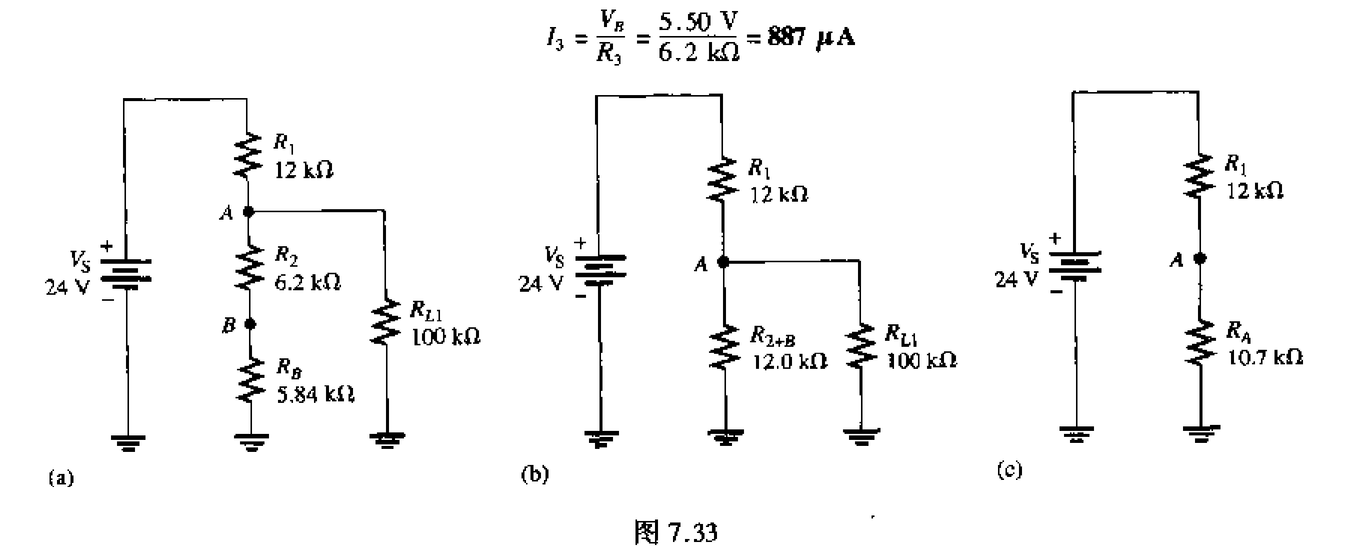


图 7.33

练习：在图 7.32 中，如何在不改变负载电流的前提下减少分压器电流？

7.3.2 双极性分压器

图 7.34 所示的是一个由单电源同时实现正负分压的分压器。值得注意的是，电源的正负极都不接地，点 A 和点 B 的电压相对于地来说都是正的，而点 C 和点 D 的电压相对于地来说都是负的。

7.3 节练习

1. 一个负载接在分压器的输出端上，会对输出有什么影响？
2. 大阻值的负载电阻对电压输出产生的影响小于小阻值负载电阻的影响。(对或错)
3. 求图 7.35 所示的分压器不接负载时的对地输出电压是多少？如果负载电阻为 10 kΩ，对地的输出电压又是多少？

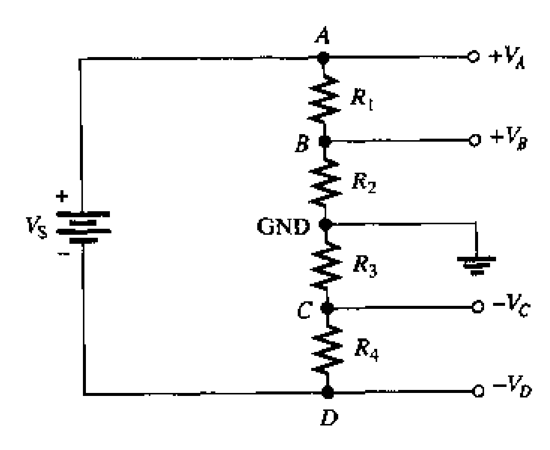


图 7.34 一个双极性分压器。正负电压值都是相对于地而言的

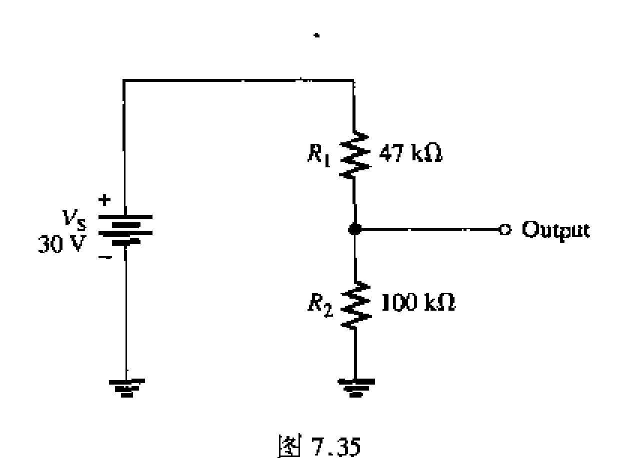


图 7.35

7.4 伏特表的负载效应

现在我们知道要测电阻两端的电压时，伏特表必须并联在电阻两端。但因为伏特表有内阻，所以在实际测量中，伏特表内阻在某种程度上会影响伏特表的测量值。到目前为止，伏特表的内阻相对来说都比较大，对测量结果的影响不太明显，所以可以忽略不计。但当伏特表内阻相对于所接入电路的电阻差别不大时，伏特表示数会由于内阻的分压作用而减小。在实际的计算中必须注意这个问题。

学完本节后读者应该能够：

- 确定伏特表内阻对电路的影响
- 解释为什么伏特表可以作为负载接入电路
- 讨论伏特表的内阻

7.4.1 伏特表为何可以作为负载接入电路

例如，一个伏特表接入电路时如图7.36(a)所示，其内阻相当于并联在 R_3 的两端，如图7.36(b)所示。由于伏特表内阻 R_M 的负载效应，点 A 和点 B 之间的电阻变为 $R_3 \parallel R_M$，如图7.36(c)所示。

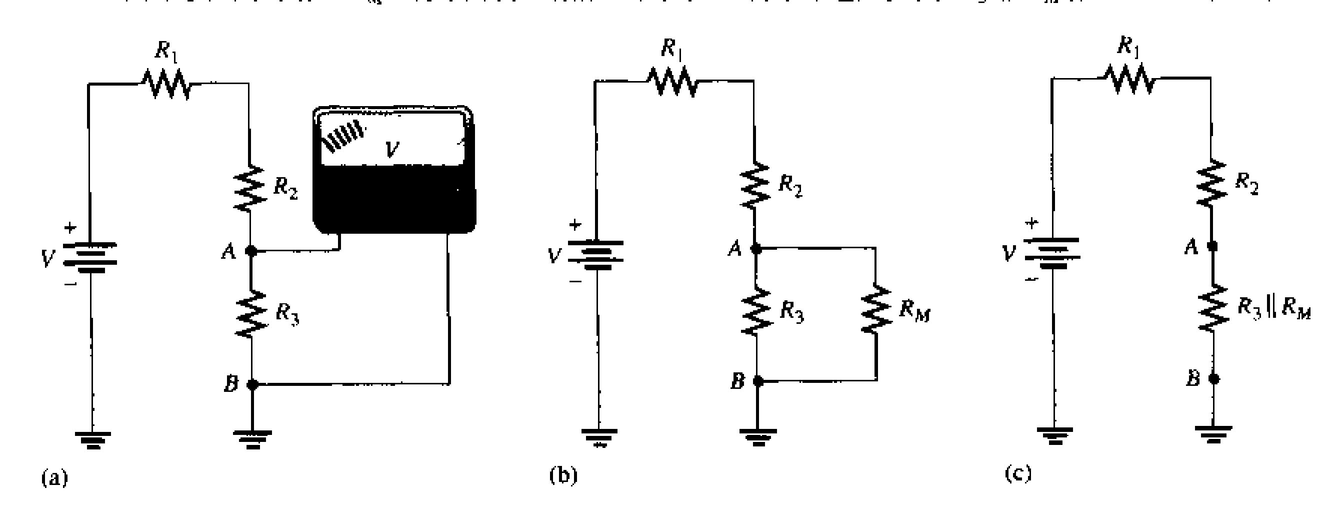


图7.36 伏特表的负载效应

如果 R_M 远大于 R_3，那么点 A 和点 B 之间电阻值的改变量非常小，伏特表的读数可以看做真实电压值。如果 R_M 并不远大于 R_3，那么点 A 和点 B 之间的电阻值会明显减小，伏特表测得的 R_3 两端的电压会有较大误差。由经验可知，根据精度要求，如果伏特表内阻对结果的影响小于10%，就可以忽略内阻。

7.4.2 伏特表的内阻

伏特表有两种：一种是电磁模拟伏特表（通常称为VOM），其内阻由灵敏度装置确定；另一种是数字式伏特表（就是最常用的伏特表，通常记为DMM），其内阻一般不小于10 MΩ。由于DMM的内阻远大于电磁模拟型伏特表的内阻，所以存在的负载问题也比电磁模拟伏特表少得多。

例7.15 如图7.37所示，各图中数字式伏特表在测量时对电压的影响有多大？假设伏特表的输入电阻（R_M）均为10 MΩ。

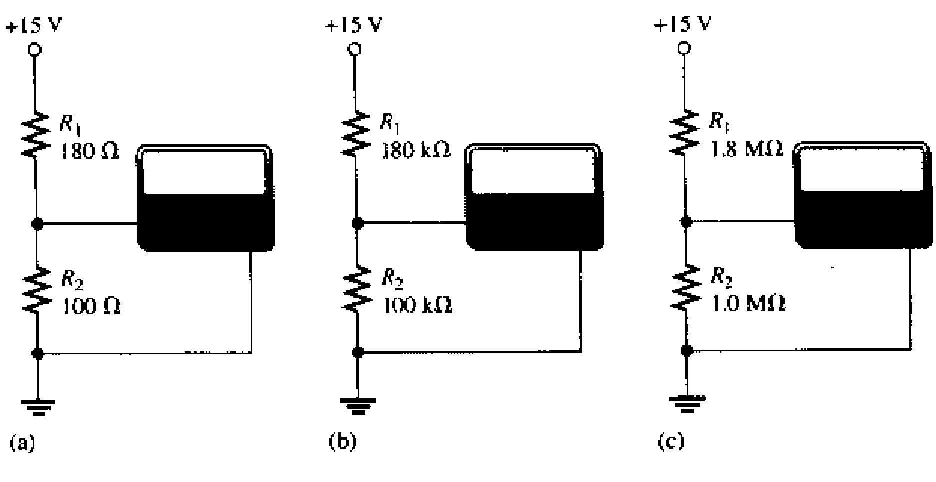


图 7.37

解:(a)在图 7.37(a)所示的分压器电路中,通过分压电路 R_2 的电压为:

$$V_2\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_S=\left(\frac{100\ \Omega}{280\ \Omega}\right)15\ \text{V}=5.357\ \text{V}$$

伏特表的内阻与 R_2 并联,得到:

$$R_2\parallel R_M=\left(\frac{R_2R_M}{R_2+R_M}\right)=\frac{(100\ \Omega)(10\ \text{M}\Omega)}{10.0001\ \text{M}\Omega}=99.999\ \Omega$$

伏特表的实际测得的电压为:

$$V_2=\left(\frac{R_2\parallel R_M}{R_1+R_2\parallel R_M}\right)V_S=\left(\frac{99.999\ \Omega}{279.999\ \Omega}\right)15\ \text{V}=5.357\ \text{V}$$

所以,伏特表在测量时对电路没有影响。

(b)根据图 7.37(b),

$$V_2=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_S=\left(\frac{100\ \text{k}\Omega}{280\ \text{k}\Omega}\right)15\ \text{V}=5.357\ \text{V}$$

$$R_2\parallel R_M=\frac{R_2R_M}{R_2+R_M}=\frac{(100\ \text{k}\Omega)(10\ \text{M}\Omega)}{10.1\ \text{M}\Omega}=99.01\ \text{k}\Omega$$

伏特表实际测得电压为:

$$V_2=\left(\frac{R_2\parallel R_M}{R_1+R_2\parallel R_M}\right)V_S=\left(\frac{99.01\ \text{k}\Omega}{279.01\ \text{k}\Omega}\right)15\ \text{V}=5.323\ \text{V}$$

所以,该伏特表对电路进行测量时对电路有分压作用,使得电压有一个较小的减少量。

(c)如图 7.37(c)所示,

$$V_2=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_S=\left(\frac{1.0\ \text{M}\Omega}{2.8\ \text{M}\Omega}\right)15\ \text{V}=5.357\ \text{V}$$

$$R_2\parallel R_M=\frac{R_2R_M}{R_2+R_M}=\frac{(1.0\ \text{M}\Omega)(10\ \text{M}\Omega)}{11\ \text{M}\Omega}=909.09\ \text{k}\Omega$$

实际测得电压为:

$$V_2=\left(\frac{R_2\parallel R_M}{R_1+R_2\parallel R_M}\right)V_S=\left(\frac{909.09\ \text{k}\Omega}{2.709\ \text{M}\Omega}\right)15\ \text{V}=5.034\ \text{V}$$

伏特表在电路中作为一个负载,使得电路输出电压明显减小。由上面的结论可以看到,被测量的电阻越大,对伏特表的影响越大。

练习:如图 7.37(c)所示,伏特表的内阻为 20 MΩ 时,求通过 R_2 的电压是多少?

7.4 节练习

1. 解释为什么伏特表可以作为电路的负载。
2. 如果用一个内阻为 10 MΩ 的伏特表来测量一个阻值为 1.0 kΩ 的电阻，能准确地判断出负载对电路的影响吗？
3. 如果用一个内阻为 10 MΩ 的伏特表来测量一个阻值为 3.3 MΩ 的电阻，能准确地判断出负载对电路的影响吗？

7.5 梯形网络

梯形电阻网络是串并联电路的一种特殊形式。梯形网络的一种形式通常是用来将电压衰减到一定的加权值，从而实现 A/D 转换（数/模转换）。在本节中，我们将就基本梯形电阻网络的一些性质进行研究。

学完本节后读者应该能够：

- 分析梯形网络
- 确定三级梯形网络的电压
- 分析 $R/2R$ 梯形网络

分析梯形网络的一种方法是，从离电源最远的一端开始，逐步进行化简，如图 7.38 所示。用这种方法，可以确定电路中任何一条支路的电流，或是任何一点的电压，如例 7.16 所示。

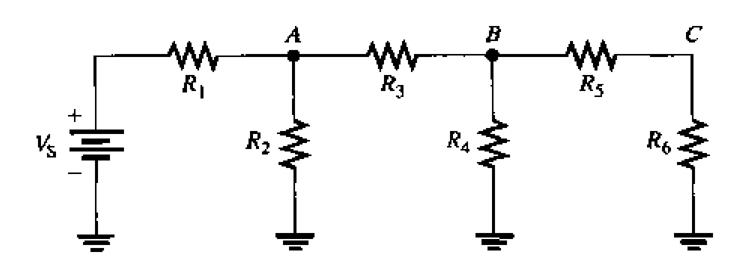


图 7.38 基本三级梯形网络

例 7.16 图 7.39 所示的梯形网络中，求通过各个电阻的电流值，以及所标注的各节点对地的电压值分别是多少？

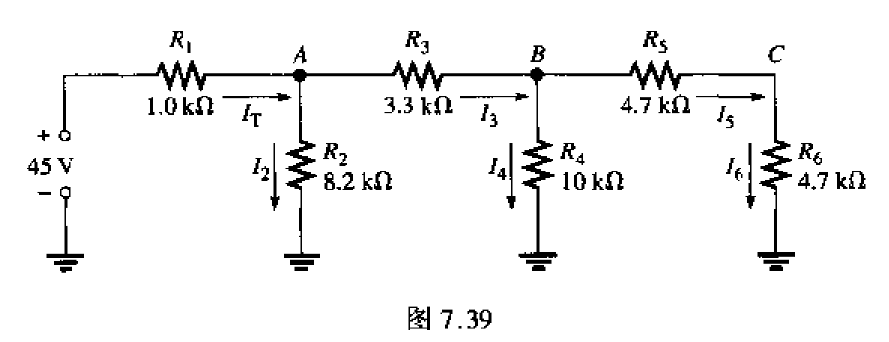


图 7.39

解：为了确定流过各电阻的电流值，必须知道从电源流出的总电流值（I_T）。为了确定 I_T，首先要确定从电源出发所看到的总的电阻值。

我们从图的右侧开始逐步确定出 R_T。首先注意 R_5 与 R_6 串联再与 R_4 并联。所以，点 B 与地之间的电阻值为：

$$R_B = \frac{R_4(R_5+R_6)}{R_4+(R_5+R_6)} = \frac{(10\ \text{k}\Omega)(9.4\ \text{k}\Omega)}{19.4\ \text{k}\Omega} = 4.85\ \text{k}\Omega$$

利用 R_B(点 B 与地之间的电阻值)，可以画出图7.40所示的等效电路图。

然后，点 A 与地之间的电阻(R_A)由 R_3 与 R_B 串联再和 R_2 并联，则电阻 R_A 的计算如下：

$$R_A = \frac{R_2(R_3+R_B)}{R_2+(R_3+R_B)} = \frac{(8.2\ \text{k}\Omega)(8.15\ \text{k}\Omega)}{16.35\ \text{k}\Omega} = 4.09\ \text{k}\Omega$$

根据 R_A，可以进一步对图7.40进行等效化简，如图7.41所示。

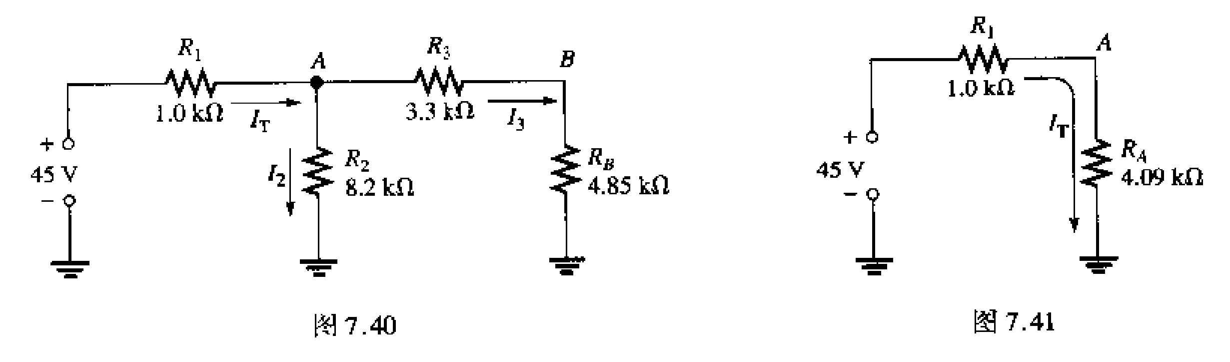


图7.40　　　　图7.41

最后，与电源直接相连的总电阻是电阻 R_1 与 R_A 的串联组合，可得：

$$R_T = R_1 + R_A = 1.0\ \text{k}\Omega + 4.09\ \text{k}\Omega = 5.09\ \text{k}\Omega$$

总电流为：

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{45\ \text{V}}{5.09\ \text{k}\Omega} = \mathbf{8.84\ mA}$$

由图7.40可以看出，I_T 在点 A 由电阻 R_2 和 R_3+R_B 两条支路分流。在本例中，由于两条支路的电阻值近似相等，所以流过两条支路的电流值相等，即：

$$I_2 = \mathbf{4.42\ mA}$$

$$I_3 = \mathbf{4.42\ mA}$$

如果两条支路的电阻值不相等，可以根据分流公式求出支路的电流值。如图7.39所示，流入点 B 的电流 I_3 分成电阻 R_4 的支路和 R_5+R_6 的支路。因此，可求得流过 R_4，R_5 和 R_6 的电流值分别是：

$$I_4 = \left(\frac{R_5+R_6}{R_4+(R_5+R_6)}\right) I_3 = \left(\frac{9.4\ \text{k}\Omega}{19.4\ \text{k}\Omega}\right) 4.42\ \text{mA} = \mathbf{2.14\ mA}$$

$$I_5 = I_6 = I_3 - I_4 = 4.42\ \text{mA} - 2.14\ \text{mA} = \mathbf{2.28\ mA}$$

根据欧姆定律，求得 V_A，V_B 和 V_C 分别是：

$$V_A = I_2 R_2 = (4.42\ \text{mA})(8.2\ \text{k}\Omega) = \mathbf{36.2\ V}$$

$$V_B = I_4 R_4 = (2.14\ \text{mA})(10\ \text{k}\Omega) = \mathbf{21.4\ V}$$

$$V_C = I_6 R_6 = (2.28\ \text{mA})(4.7\ \text{k}\Omega) = \mathbf{10.7\ V}$$

练习：当 R_1 增加到2.2 kΩ时，计算图7.39中流过每个电阻的电流和每个节点的电压。

7.5.1 *R*/2*R* 梯形网络

图7.42所示的是一个基本的 $R/2R$ 网络结构，其命名是由电阻值之间的关系而来的(一组电阻的阻值为另一组电阻值的两倍)。这种形式的梯形网络用于将数字编码转化为语音、音乐及其他形式的模拟信号的应用中。例如，在数字式录音与播放领域，这种应用称为数/模(D/A)转换。

观察图7.43所示的例子，了解一个基本的四级电路中 $R/2R$ 网络的工作原理。在后面的数字基础课程中，读者将进一步了解到这种电路是如何用于D/A转换的。

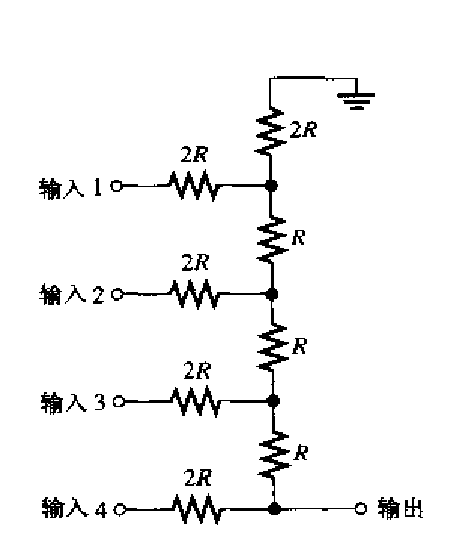


图7.42 一个基本的四级 $R/2R$ 梯形网络

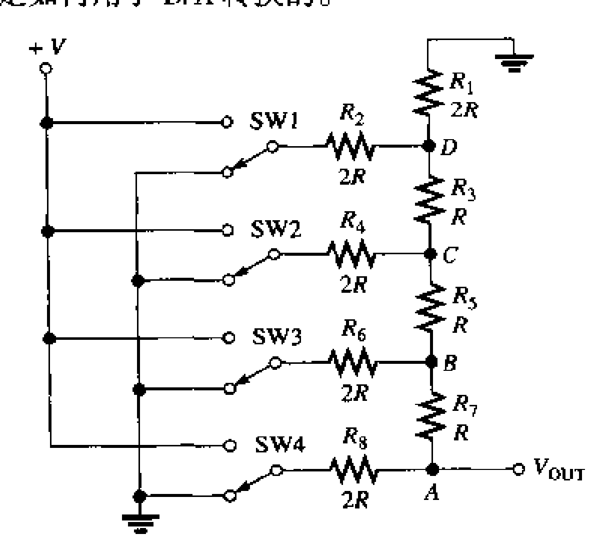


图7.43 带开关输入的 $R/2R$ 网络模拟二进制（数字）编码

该图中，开关用来模拟数字信号输入（二进制）。一个开关的位置是与地（0 V）相连，其他位置是与电源正电压端（V）相连。分析方法如下：先假设图7.43中开关SW4与电源 V 端相连，其他开关接地。这样，电路的输入就如图7.44(a)所示。

为求点 A 与地之间的总电阻，首先将与点 D 相连的电阻 R_1 和 R_2 并联，得到化简后的电路图如图7.44(b)所示。

$$R_1 \parallel R_2 = \frac{2R}{2} = R$$

$R_1 \parallel R_2$ 再与点 C 到地之间的 R_3 串联，如图7.44(c)所示，得：

$$R_1 \parallel R_2 + R_3 = R + R = 2R$$

然后，将以上所求出来的电阻与点 C 到地之间的 R_4 并联，如图7.44(d)所示，得：

$$(R_1 \parallel R_2 + R_3) \parallel R_4 = 2R \parallel 2R = \frac{2R}{2} = R$$

继续简化，可得到如图7.44(e)所示的电路，其输出电压可以用分压公式表示为：

$$V_{OUT} = \left(\frac{2R}{4R}\right)V = \frac{V}{2}$$

如图7.43所示，将开关SW3接电源 V 端，其余三个开关接地。通过类似的分析，可以得出图7.45所示的简化电路图。

对电路图的分析如下：点 B 与地之间的电阻为：

$$R_B = (R_7 + R_8) \parallel 2R = 3R \parallel 2R = \frac{6R}{5}$$

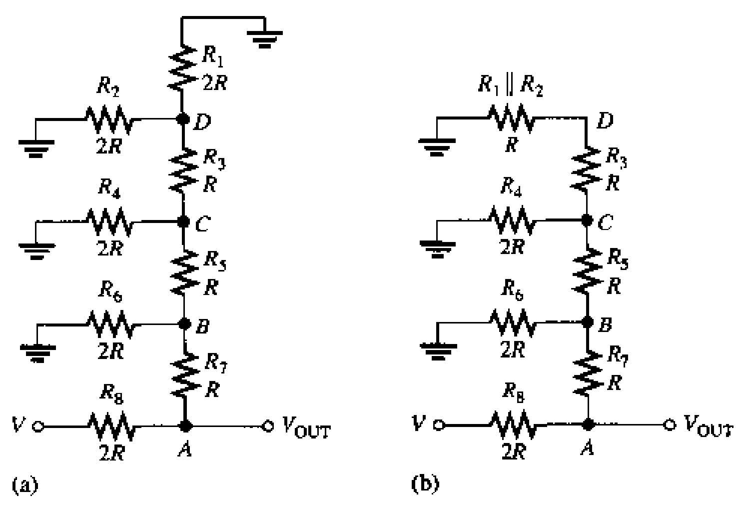
利用分压公式，可以得出点 B 对地的输出电压为：

$$V_B = \left(\frac{R_B}{R_6 + R_B}\right)V = \left(\frac{6R/5}{2R + 6R/5}\right)V = \left(\frac{6R/5}{10R/5 + 6R/5}\right)V = \left(\frac{6R/5}{16R/5}\right)V = \left(\frac{6R}{16R}\right)V = \frac{3V}{8}$$

因此，输出电压是：

$$V_{OUT}=\left(\frac{R_8}{R_7+R_8}\right)V_B=\left(\frac{2R}{3R}\right)\left(\frac{3V}{8}\right)=\frac{V}{4}$$

值得注意的是,此时的输出电压($V/4$)是开关 SW4 接电源时的输出电压($V/2$)的一半。



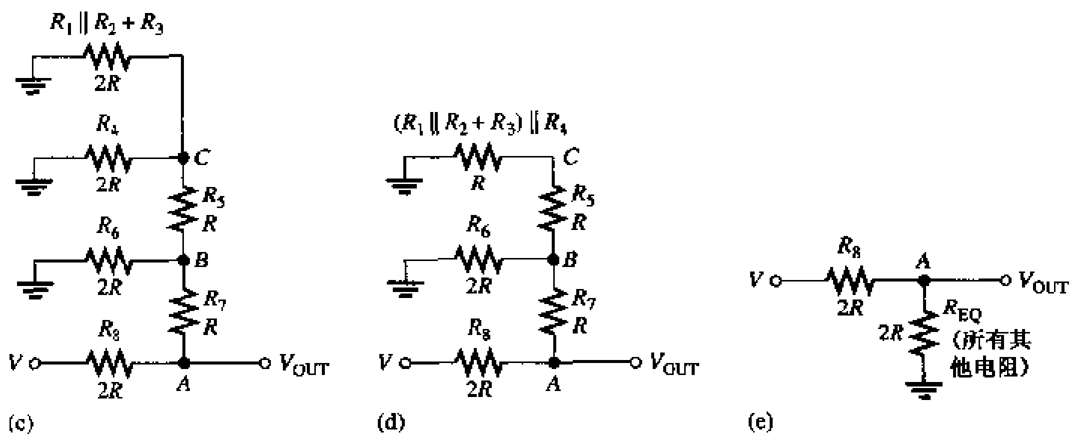


图 7.44　$R/2R$ 梯形网络分析简图

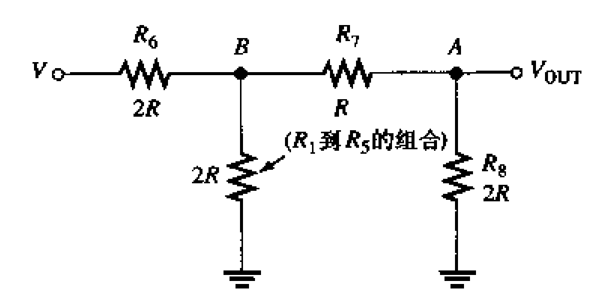


图 7.45　图 7.43 中,只有 SW3 接输入 V 端的简化梯形网络

对图 7.43 中其余的开关进行同样的分析可以得出:开关 SW2 接电源 V 端,其他开关接地时的输出电压为:

$$V_{OUT}=\frac{V}{8}$$

开关 SW1 接电源 V 端,其他开关接地时的输出电压为:

$$V_{OUT}=\frac{V}{6}$$

当两个或两个以上的开关同时接电源 V 端时，总输出电压为各个开关分别单独接电源时的各输出之和。这种输入/输出电压间的电平转换关系，在 $R/2R$ 数/模转换电路的应用中非常重要。

7.5 节练习

1. 画一个基本四级梯形网络的电路结构图。
2. 如图 7.46 所示的梯形网络，求对于电源的电路总电阻是多少？
3. 电路如图 7.46 所示，求总电流是多少？
4. 电路如图 7.46 所示，求通过 R_2 的电流是多少？
5. 电路如图 7.46 所示，求点 A 对地的电压是多少？

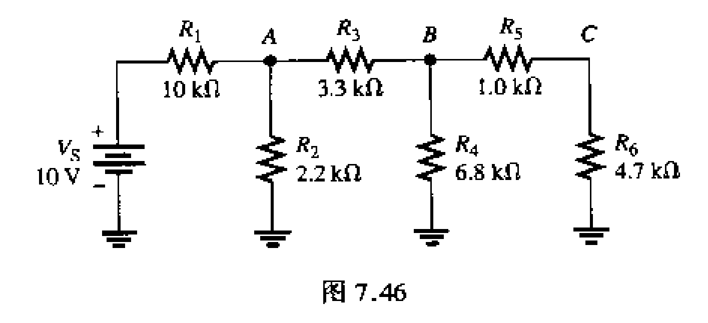


图 7.46

7.6 惠斯通电桥

惠斯通电桥广泛用于精确测量电阻。同时，这种电桥可以与传感器一起使用，进行物理方面的测量，例如张力、温度以及压力等量的测量。传感器是测试物理参数变化（如电阻值的变化）并将这种变化转化成电信号的装置。例如，变形测量器在机械受到力、压强或是在不适当放置的情况下，表现为电阻发生改变；热敏电阻由于受到温度的影响而使得电阻发生改变。惠斯通电桥可以工作在平衡与不平衡的两种条件下，工作条件取决于应用所要求的类型。

学完本节后读者应该能够：

- 分析惠斯通电桥电路
- 确定电桥何时平衡
- 利用平衡电桥确定未知电阻
- 确定电桥何时不平衡
- 讨论利用不平衡电桥的测量

惠斯通电桥中最常见的菱形结构如图 7.47(a)所示。这种结构包含四个电阻，一个连接菱形顶角和底角的直流电源，输出电压为菱形左侧点 A 和点 B 之间的电压。图 7.47(b)用另一种略有不同，但清晰地显示出各电阻之间串并联关系的结构。

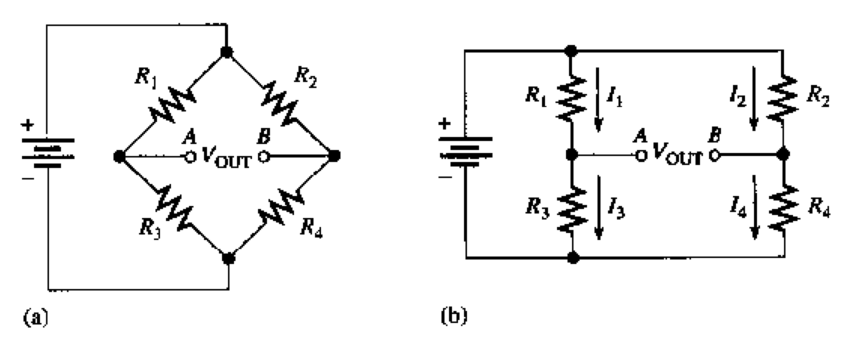


图 7.47　惠斯通电桥

7.6.1 平衡的惠斯通电桥

如图7.47所示，当电路中点 A 和点 B 之间的输出电压(V_{OUT})等于0时，该惠斯通电桥为平衡电桥。

$$V_{OUT} = 0\ \text{V}$$

电桥平衡时 R_1 和 R_2 端电压相等($V_1 = V_2$)，R_3 和 R_4 端电压相等($V_3 = V_4$)。所以，电压比例可以写成下式：

$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{V_2}{V_4}$$

根据欧姆定律，用 IR 代替 V，可得：

$$\frac{I_1 R_1}{I_3 R_3} = \frac{I_2 R_2}{I_4 R_4}$$

由 $I_1 = I_3$，$I_2 = I_4$，消去所有的电流项，只剩下电阻比：

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

可以解得 R_1：

$$R_1 = R_3\left(\frac{R_2}{R_4}\right)$$

由此式可以得出，电桥平衡时 R_1 的阻值可以由其他电阻来表示。同时，也可以用相同的方法求出其他任意电阻的值。

利用平衡惠斯通电桥求未知电阻 假设图7.47中的电阻 R_1 未知，将其设为 R_X。电阻 R_2 和 R_4 阻值是不变的，从而得到比值 R_2/R_4 也固定不变。既然 R_X 可以为任意值，则 R_3 必须满足 $R_1/R_3 = R_2/R_4$，以使得系统达到平衡。因此，R_3 是一个可变电阻，将其记为 R_V。当电路中含有 R_X 时调整 R_V，使电路达到输出电压为零时的平衡状态。未知电阻可表示为：

$$R_X = R_V\left(\frac{R_2}{R_4}\right) \tag{7.2}$$

比值 R_2/R_4 是比例系数。

通常我们在输出端 A 和 B 之间接上检流计，来测定系统平衡状态。灵敏检流计实际上是一个对任意方向的电流都反应敏锐的电流表。与一般电流表的不同之处在于，它正中间的刻度是电流的零点。电流从一个方向流入，指针会指向正极；从另一个方向流入，指针会指向负极。当指针在正中央时，电桥处于平衡态，因为 A 到 B 间的电压为0，即流过灵敏检流计的电流为0，如图7.48所示。电压表也可以用来判别电桥平衡态。

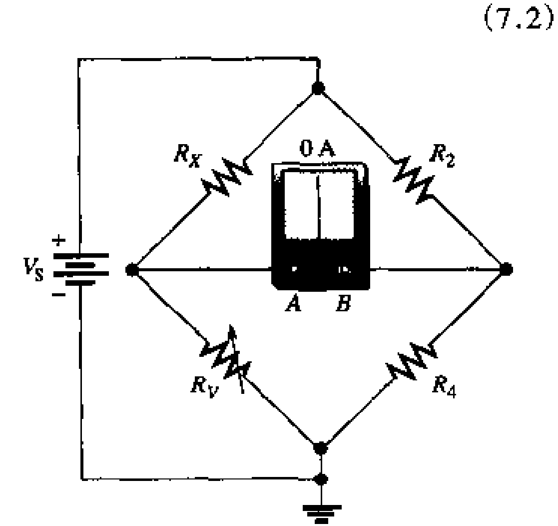


图7.48 当检流计的电流为0 A时，惠斯通电桥平衡

由式(7.2)可知，R_X 的阻值等于平衡态时 R_V 的电阻值和比例因子 R_2/R_4 的乘积。如果 $R_2/R_4 = 1$，则 $R_X = R_V$；如果 $R_2/R_4 = 0.5$，则 $R_X = 0.5R_V$。在实际电桥电路中，可通过对 R_V 的调节，对刻度盘或其他显示方法中 R_X 的真实值进行校准。

例 7.17　电路如图 7.49 所示，求平衡电桥 R_X 的真实值是多少？

解： 比例因子为：

$$\frac{R_2}{R_4}=\frac{150\ \Omega}{100\ \Omega}=1.5$$

当 $R_V = 1200\ \Omega$ 时，电桥处于平衡态，即 $V_{OUT}=0$ V，所以未知电阻为：

$$R_X = R_V\left(\frac{R_2}{R_4}\right)=(1200\ \Omega)(1.5)=\mathbf{1800\ \Omega}$$

练习： 如图 7.49 所示，R_V 必须调到 2.2 kΩ 才能使电桥平衡，那么 R_X 的值是多少？

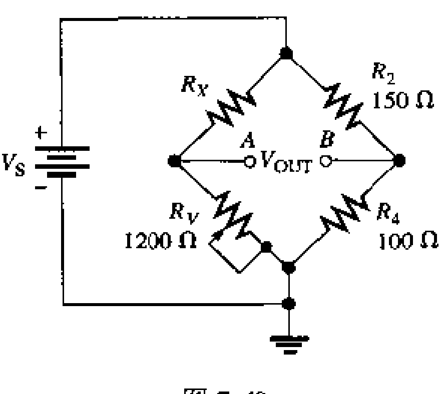


图 7.49

7.6.2　不平衡惠斯通电桥

输出电压不等于 0 时，电桥称为不平衡电桥。这种电桥经常用来测量拉力、温度和压强等物理量。这种测量方法可以通过将传感器接在电桥的一条支路上来实现，如图 7.50 所示。传感器电阻的变化与待测物理量成比例。如果电桥在已知点处平衡，可以通过输出电压来求得偏离平衡条件的量，并以此求得待测物理量的变化。因此，待测物理量可以由电桥不平衡量来求得。

测量温度的电桥电路　要测量温度，传感器应该是一个热敏电阻，其阻值随温度的改变而改变。热敏电阻受到外界温度影响时会改变自身的阻值，相应地会使电路产生一个打破平衡状态的输出电压。所以，输出电压与温度成比例变化。因此，可以用一个电压表跨接在输出端以精确显示温度变化，或是将输出电压放大后转换为数字形式，用来驱动温度显示器。

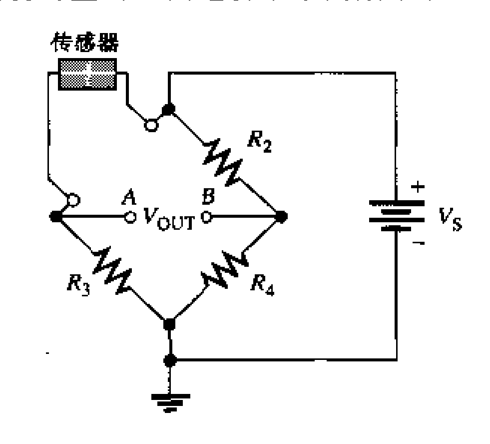


图 7.50　使用传感器测量物理量的电桥电路

用于测量温度的电桥电路中一般将电路平衡状态设置为参考温度，一旦温度改变，平衡状态即被打破。比如，一个电桥平衡态调节于 25℃，热敏电阻在这种条件下有一个已知确定的电阻。为了计算简便，不妨设其他三条支路的电阻都等于此时的热敏电阻。于是，$R_{therm}=R_2=R_3=R_4$。对于这种特殊情况，其输出电压改变量可以表示如下：

$$\Delta V_{OUT}=\Delta R_{therm}\left(\frac{V_S}{4R}\right) \tag{7.3}$$

在任一变量前的 Δ(希腊字母 delta)，表示任意变量的改变量。此公式只适用于平衡状态下，所有电桥中的电阻阻值相等的情况。切记，电桥最初平衡时无须所有电阻相等，只要 $R_1=R_2$ 和 $R_3=R_4$ 即可(如图 7.47 所示)，但这种情况下公式更为复杂。

例 7.18　如图 7.51 所示，求 50℃ 的测温电桥电路的输出电压是多少？已知热敏电阻在 25℃ 时的阻值为 1.0 kΩ，假设 50℃ 时，电阻值减少为 900 Ω。

解：

$$\Delta R_{therm}=1.0\ \text{k}\Omega-900\ \Omega=100\ \Omega$$

$$\Delta V_{OUT}=\Delta R_{therm}\left(\frac{V_S}{4R}\right)=100\ \Omega\left(\frac{12\ \text{V}}{4\ \text{k}\Omega}\right)=0.3\ \text{V}$$

电桥在25℃时平衡,温度升至50℃,电压由0 V改变至0.3 V,那么,

$$V_{OUT} = \mathbf{0.3\ V}$$

练习:如果温度升至60℃时,如图7.51所示的热敏电阻减少至850 Ω。求输出电压是多少?

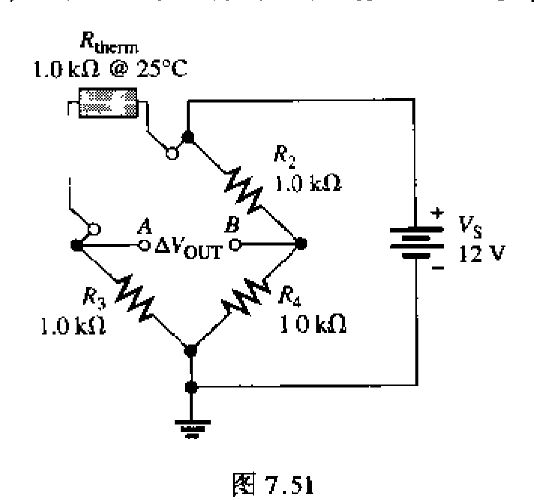


图7.51

不平衡惠斯通电桥的其他应用 一个与检流计相连的电桥可以用来测量压力的大小,变形测量器将外力对自身的挤压或拉伸反映在阻值变化的元件上。当变形测量器的阻值变化时,电桥平衡态被打破。不平衡导致电压从0开始变化,而且这种可测量的变化可以确定拉力的数值。在变形测量器中,拉力引起的阻值变化非常小。这个微小的变化可以影响电桥的平衡态,因为电桥本身的灵敏度非常高。例如,带有变形测量器的惠斯通电桥一般用于比较精密的测量。

采用类似的方法,改造后的惠斯通电桥可以用来测量压力大小。传感器电阻相对于压力成比例的变化,也可以使电桥变成非平衡状态。

7.6节练习

1. 画一个基本的惠斯通电桥电路。
2. 在什么条件下电桥是平衡的?
3. 图7.48所示的电路中,已知 $R_V = 3.3\ k\Omega, R_2 = 10\ k\Omega, R_4 = 2.2\ k\Omega$,那么未知电阻值是多少?
4. 惠斯通电桥在不平衡条件下如何运用?

7.7 故障检修

众所周知,故障检修是在电路中确定并定位电路中所出现故障的一个过程。关于一些故障排除技术以及一些逻辑思维方法,我们已经在串联电路和并联电路部分中讨论过。在排除故障之前,首先要确定检查的对象,这是电路故障排除的一个最基本的前提。这种观念同样适用于混联电路。

学完本节后读者应该能够:

- 对混联电路进行故障检修
- 确定电路中开路的影响
- 确定电路中短路的影响
- 确认开路和短路

开路和短路是电路中的典型问题。正如第5章里所讲到的,如果电阻烧毁,将造成电路开

路。焊点虚接、电线烧毁,或是接触不良都可能引起开路问题。绝缘层上多余的焊锡、电线的绝缘层损坏等经常会使电路短路。短路可以看成两点之间的电阻为 0。

更进一步,可以这样理解部分开路和部分短路。部分开路就是其电路电阻值远远大于正常的电阻值,但也不是无限大;部分短路就是其电阻值远远小于正常的电阻值,但不为 0。

现在以下面三道例题来说明混联电路中的故障检修问题。

例 7.19　根据图 7.52 中电压表的读数,判断电路中是否有故障。如果有,判断是由开路还是短路引起的。

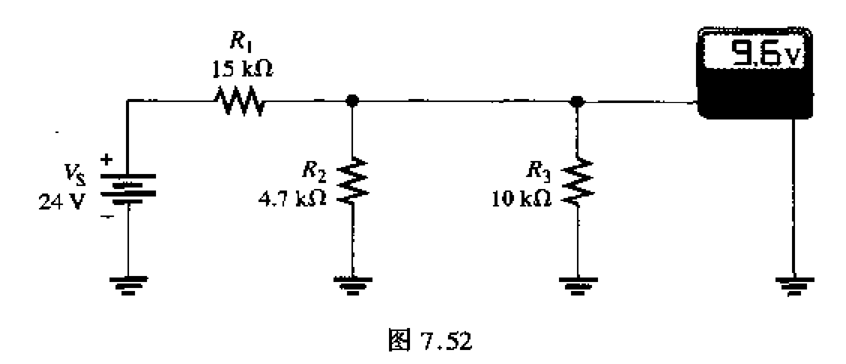


图 7.52

解:第一步:分析

如果电路测量有错误,那么在测量之前,应该知道测量的对象。首先按照以下的步骤,判断电压表的读数应该是多少? R_2 和 R_3 并联,总电阻是:

$$R_{2\parallel3}=\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}=\frac{(4.7\ \text{k}\Omega)(10\ \text{k}\Omega)}{14.7\ \text{k}\Omega}=3.20\ \text{k}\Omega$$

根据分压公式,该并联电路两端的电压应为:

$$V_{2\parallel3}=\left(\frac{R_{2\parallel3}}{R_1+R_{2\parallel3}}\right)V_S=\left(\frac{3.2\ \text{k}\Omega}{18.2\ \text{k}\Omega}\right)24\ \text{V}=4.22\ \text{V}$$

由计算可以得出,电压表的读数应该是 4.22 V,但实际测得的读数是 9.6 V。所以题中给出的值是错误的,并且高于实际值,因此 R_2 和 R_3 中必有一个开路。理由是,如果这两个电阻中有任何一个开路,电压表所测量的电阻值都应该大于电阻的实际值。电路中的电阻值增大,它两端的电压将变大。

第二步:计划

首先假设 R_2 开路。如果 R_2 开路,那么 R_3 的端电压应为:

$$V_3=\left(\frac{R_3}{R_1+R_3}\right)V_S=\left(\frac{10\ \text{k}\Omega}{25\ \text{k}\Omega}\right)24\ \text{V}=9.6\ \text{V}$$

由于实际计算值与电压表显示的值相等,均为 9.6 V,因此 R_2 可能开路。

第三步:测量

断开电源,并去掉 R_2。测量 R_2 的电阻值,来确定其是否开路。如果 R_2 正常,则检查电线、连接点,或是 R_2 周围的连接点,查找开路点。

练习:如果图 7.52 中的 R_3 开路,电压表的读数应该是多少? 如果是 R_1 开路呢?

例 7.20　假设用电压表测出的电压值为 24 V,如图 7.53 所示。指出电路中是否有故障,如果有,确定故障。

解:第一步:分析

R_1 两端都接 +24 V 的电压,所以其电压降为 0,并且也没有电流通过。说明电路中 R_2 开路,或者 R_1 短路。

第二步:计划

最有可能出现的问题是 R_2 开路,此时没有电流流过。为了证明这一点,可以采用测量 R_2 两端电压

的方法。如果 R_2 开路，电压表的读数为 24 V。R_2 右侧的电压应为 0 V，因为此时没有电压降，即没有电流流过其他电阻。

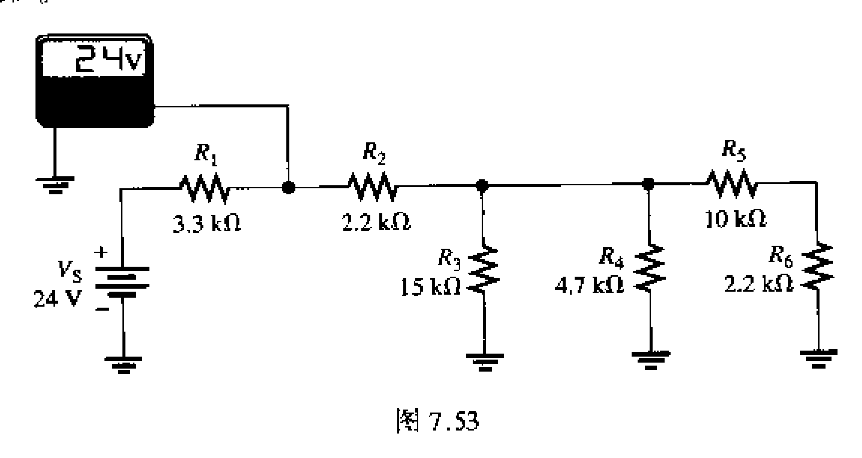


图 7.53

第三步：测量

如图 7.54 所示，测量值可以验证 R_2 是否开路。

练习：如图 7.53 所示，若 R_5 开路，其端电压是多少？(假设没有其他故障。)

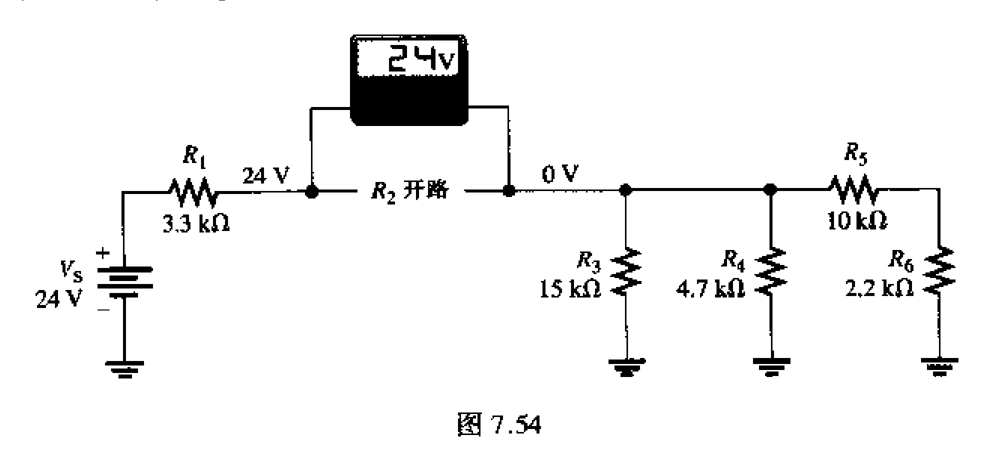


图 7.54

例 7.21 两电压表的读数如图 7.55 所示。运用所学的电路知识，确定电路中是否有开路或短路故障，如果有，请确定其位置。

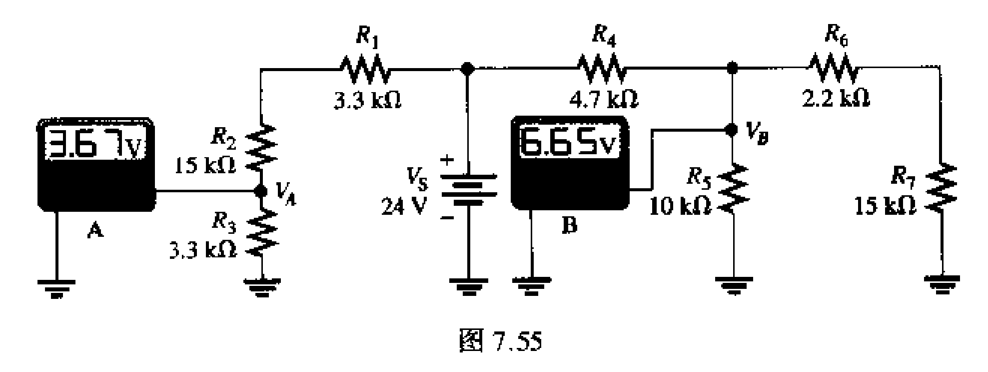


图 7.55

解：首先确定电压表读数是否正常。R_1，R_2 和 R_3 组成分压器，R_3 两端的电压计算如下：

$$V_A = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right) V_S = \left(\frac{3.3\ \text{k}\Omega}{21.6\ \text{k}\Omega}\right) 24\ \text{V} = 3.67\ \text{V}$$

电压表 A 的读数正确，说明 R_1，R_2 和 R_3 的连线没有故障。

现在看电压表 B 的读数是否正确。$R_6 + R_7$ 与 R_5 并联，并且这个混联的结果与 R_4 再进行串联。R_5，R_6 和 R_7 混联后的总电阻为：

$$R_{5\|(6+7)}=\frac{R_5(R_6+R_7)}{R_5+R_6+R_7}=\frac{(10\ \text{k}\Omega)(17.2\ \text{k}\Omega)}{27.2\ \text{k}\Omega}=6.32\ \text{k}\Omega$$

这个混联部分和 R_4 组成一个分压器.电压表 B 测得 $R_{5\|(6+7)}$ 两端的电压,可以利用下面的公式来检验:

$$V_B=\left(\frac{R_{5\|(6+7)}}{R_4+R_{5\|(6+7)}}\right)V_S=\left(\frac{6.32\ \text{k}\Omega}{11\ \text{k}\Omega}\right)24\ \text{V}=13.8\ \text{V}$$

在该点实际测量值是 6.65 V,所以该点测量值不正确。进一步运用逻辑思维解决该问题。

R_4 没有开路,因为如果开路,电压表的读数应该为 0 V;如果短路,电压表的读数应该为 24 V。题中所给的测量值比计算得到的值要小,那么 $R_{5\|(6+7)}$ 一定比计算所得的 6.32 kΩ 这一值要小。因此最大的可能性就是短路。如果 R_7 与地之间短路,那么 $R_5\parallel R_6$ 得:

$$R_5\parallel R_6=\frac{R_5R_6}{R_5+R_6}=\frac{(10\ \text{k}\Omega)(2.2\ \text{k}\Omega)}{12.2\ \text{k}\Omega}=1.80\ \text{k}\Omega$$

则 V_B 是:

$$V_B=\left(\frac{1.80\ \text{k}\Omega}{6.5\ \text{k}\Omega}\right)24\ \text{V}=6.65\ \text{V}$$

此时的计算值 V_B 与题中所给出的电压表 B 的读数一致,所以 R_7 发生短路。可以在实际电路中试着找出造成短路的原因。

练习: 如果图 7.55 中的故障只是由于 R_2 短路所引起的,那么电压表 A 和电压表 B 的读数应该分别是多少?

7.7 节练习

1. 说出两种常见类型的电路故障。
2. 如图 7.56 所示,已知电路中有一个电阻开路。根据电压表的读数,试确定是哪一个电阻开路?
3. 如图 7.57 所示,若有以下故障,测得点 A 的对地电压是多少?

   (a) 没有故障　(b) R_1 开路　(c) R_5 短路　(d) R_3 和 R_4 开路　(e) R_2 开路

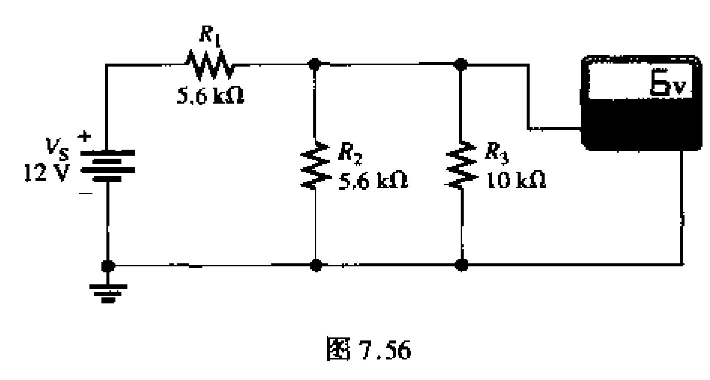


图 7.56

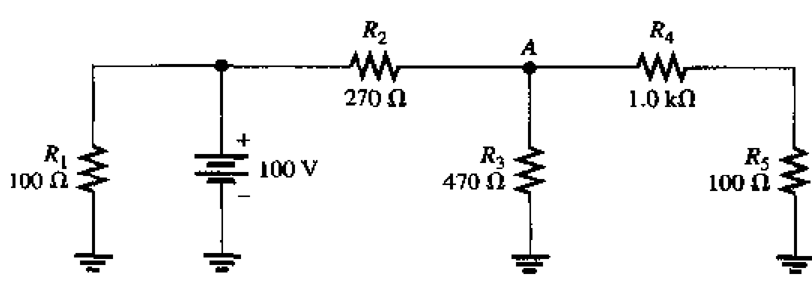


图 7.57

技术实践

PC板上设计的是一个有三个电压输出的分压器。分压器是用于便携式电源中的组件，实际应用的测量仪器提供三个不同的参考电压。这个组件包含了一个电池组和一个电压调节器，可以给分压器电路板提供稳定的+12 V电压。这次的任务是要求应用负载分压器、基尔霍夫定律和欧姆定律的知识，根据各种可能的负载配置提供的电压和电流，来确定分压器的工作参数。同时，应该对多功能的电路进行故障检修。

图7.58　分压器电路板

分压器的原理图

- 如图7.58所示，画出其原理图，并标上电路板上的电阻值。

提供12 V的电源

- 具体说明如何连接一个12 V电源给电路板，使所有的电阻都串联，且引线2的输出电压最高。

无负载的输出电压

- 确定每个无负载连接的输出电压，并填入图7.59所示的表格中。

有负载的输出电压

给每个分压器都连上10 MΩ的输入电阻，这意味着连入分压器输出的设备在输出处都有对地(电源的负极)的10 MΩ电阻。

- 确定通过以下每种负载配置的输出电压，并填入图7.59所示的表格中。

10 MΩ负载	V_{OUT} (2)	V_{OUT} (3)	V_{OUT} (4)	偏差百分比	I_{LOAD} (2)	I_{LOAD} (3)	I_{LOAD} (4)
无							
引脚2到地							
引脚3到地							
引脚4到地							
引脚2到地				2			
引脚3到地				3			
引脚2到地				2			
引脚4到地				4			
引脚3到地				3			
引脚4到地				4			
引脚2到地				2			
引脚3到地				3			
引脚4到地				4			

图7.59　电源应用分压器的工作参数表

1. 引线 2 和地之间连接一个 10 MΩ 的负载。
2. 引线 3 和地之间连接一个 10 MΩ 的负载。
3. 引线 4 和地之间连接一个 10 MΩ 的负载。
4. 引线 2 与引线 3 和地之间分别连接一个 10 MΩ 的负载。
5. 引线 2 与引线 4 和地之间分别连接一个 10 MΩ 的负载。
6. 引线 3 与引线 4 和地之间分别连接一个 10 MΩ 的负载。
7. 引线 2,引线 3,引线 4 和地之间分别连接一个 10 MΩ 的负载。

输出电压的偏差百分比

■ 计算每种负载配置的负载输出电压与先前列出的无负载的输出电压的偏差,利用以下公式表示百分比:

$$偏差百分比 = \left(\frac{V_{OUT(无负载)} = V_{OUT(有负载)}}{V_{OUT(无负载)}} \right) 100\%$$

填入图 7.59 所示的表格中。

负载电流

■ 计算先前列出的每种负载配置为 10 MΩ 负载时的电流,并填入图 7.59 所示的表格中。

故障检修

分压器电路板和一个 12 V 的电源相连接,给三个设备提供参考电压,如图 7.60 所示。用电压表测得 8 种不同情况下每个测试点的电压。

■ 如图 7.60 中所示的每种情况,确定通过电压测量得出的故障。

技术实践练习

1. 本节中的一个便携式组件同时给三个设备提供参考电压,100 mAh 的电池组作为电源能够用几天?
2. 1/8 W 的电阻是否能用于分压器电路板上?
3. 若使用 1/8 W 的电阻,是否会因一个输出对地短路使其他电阻过热而造成过大的功率?

小结

■ 串并联电路是串联和并联电流通路的结合。

■ 确定串并联电路中的总电阻,区分串联和并联的关系,并学会应用第 5 章和第 6 章中串联电阻和并联电阻的公式。

■ 应用欧姆定律和总电压随总电阻分配的原理求总电流。

■ 应用分流公式、基尔霍夫电流定律或欧姆定律,来确定分支电流。分别考虑每个电路的问题,确定最适合的方法。

■ 应用分压公式、基尔霍夫电压定律或欧姆定律,来确定串并联电路任一部分的电压降。分别考虑每个电路的问题,确定最适合的方法。

■ 在分压器的输出端连接一个负载电阻,输出电压将会减少。

■ 为了减少负载的影响,与连入的负载电阻相比原电阻应该足够大。

■ 为确定梯形网络的总电阻,要从电源最远的点开始,逐步简化电阻。

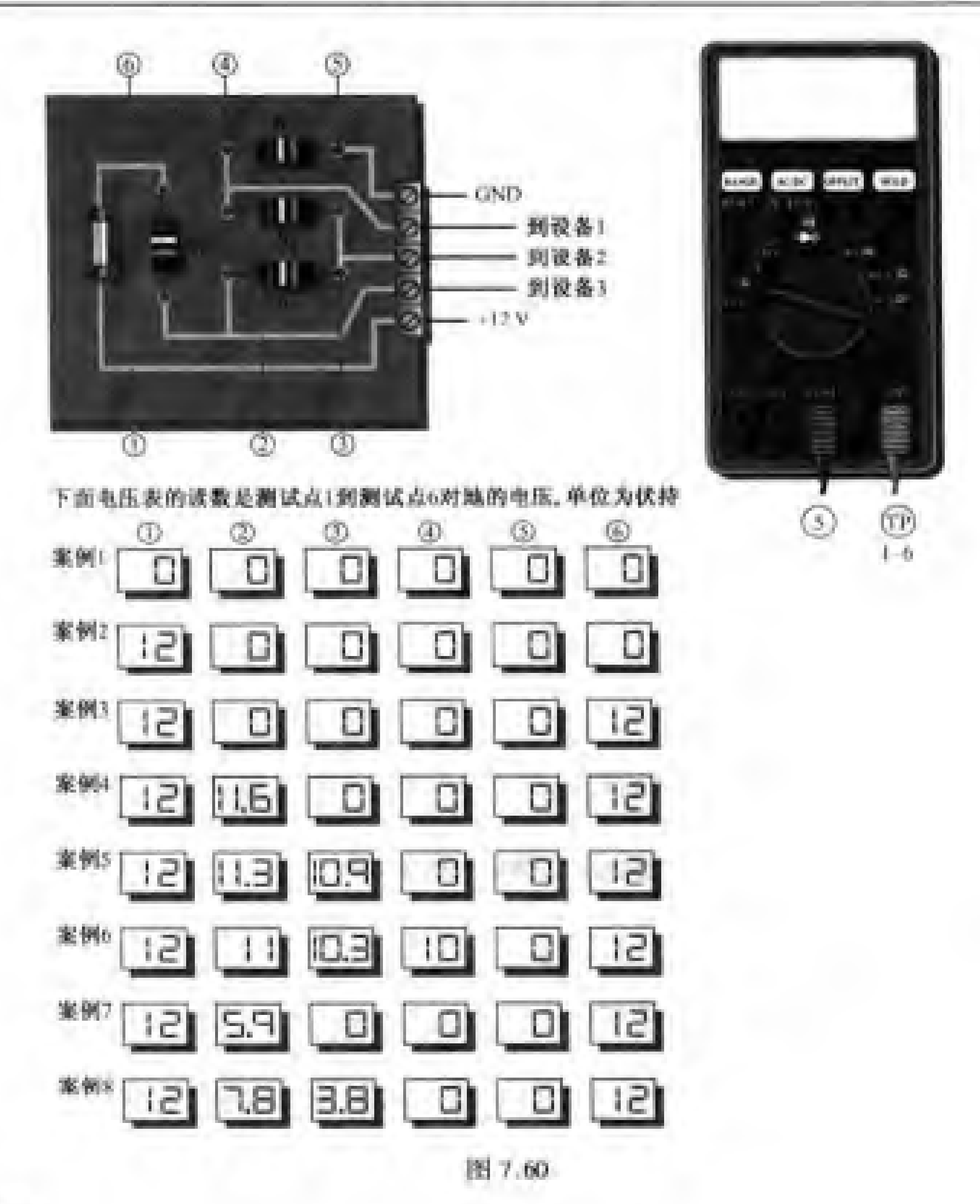
■ 平衡的惠斯通电桥可用于测量未知电阻。

■ 输出电压是 0 V 时,电桥是平衡的。平衡的条件是,连接在电桥输出端的负载上通过的电流为零。

■ 开路和短路是典型的电路故障。

■ 电阻烧毁时通常是开路。

■ 不平衡的惠斯通电桥可使用传感器来测量物理量。



	①	②	③	④	⑤	⑥
案例1	0	0	0	0	0	0
案例2	12	0	0	0	0	0
案例3	12	0	0	0	0	12
案例4	12	11.6	0	0	0	12
案例5	12	11.3	10.9	0	0	12
案例6	12	11	10.3	10	0	12
案例7	12	5.9	0	0	0	12
案例8	12	7.8	3.8	0	0	12

图 7.60

主要术语

平衡电桥：输出是 0 V 的平衡状态的电桥电路。

分压器电流：电路中的总电流减去总的负载电流后剩下的电流。

负载：一个元件(电阻或其他器件)连入电路的输出端，使电路中的电流分流。

不平衡电桥：输出电压与对称状态时的偏差成比例的不平衡状态的桥电路。

惠斯通电桥：利用平衡状态可以精确测量未知电阻的四脚桥电路。电阻的偏差可用不平衡状态测量。

公式

7.1 $I_{BLEEDER} = I_T - I_{RL1} - I_{RL2}$ 分压器的电流

7.2 $R_X = R_V\left(\frac{R_2}{R_4}\right)$ 惠斯通电桥的未知电阻

7.3 $\Delta V_{OUT} = \Delta R_{therm}\left(\frac{\Delta V_S}{4R}\right)$ 热敏电阻桥的输出

自测题

1. 电路如图 7.61 所示，下列哪一种说法是正确的？
   (a) R_1 和 R_2 与 R_3，R_4 和 R_5 串联
   (b) R_1 和 R_2 串联
   (c) R_3，R_4 和 R_5 并联
   (d) R_1 和 R_2 的串联部分与 R_3，R_4 和 R_5 的串联部分并联
   (e) 答案(b)和(d)

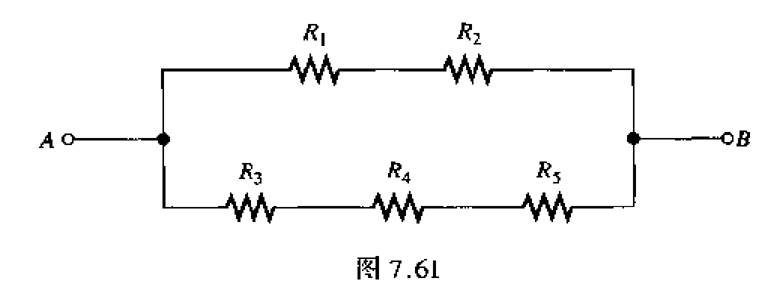


图 7.61

2. 电路如图 7.61 所示，以下哪一个公式表示总电阻？
   (a) $R_1 + R_2 + R_3 \parallel R_4 \parallel R_5$　　(b) $R_1 \parallel R_2 + R_3 \parallel R_4 \parallel R_5$
   (c) $(R_1 + R_2) \parallel (R_3 + R_4 + R_5)$　　(d) 以上都不是
3. 若图 7.61 中所有电阻的阻值一样，给点 A 和点 B 加上电压，那么各电阻上的电流：
   (a) R_5 的最大　　(b) R_3，R_4 和 R_5 的最大
   (c) R_1 和 R_2 的最大　(d) 所有电阻上的都一样
4. 两个 1.0 kΩ 的电阻串联，然后再和一个 2.2 kΩ 的电阻并联。已知其中一个 1.0 kΩ 电阻上的电压是 6 V，那么 2.2 kΩ 电阻上的电压是：
   (a) 6 V　(b) 3 V　(c) 12 V　(d) 13.2 V
5. 一个 330 Ω 电阻和一个 470 Ω 的电阻并联，然后再和四个 1.0 kΩ 电阻的并联部分串联，电路的电源是 100 V，那么电流最大的电阻的阻值是：
   (a) 1.0 kΩ　(b) 330 Ω　(c) 470 Ω
6. 电路如第 5 题中所述，那么两端电压最大的电阻的阻值是：
   (a) 1.0 kΩ　(b) 470 Ω　(c) 330 Ω
7. 第 5 题中，通过每个 1.0 kΩ 电阻的电流是总电流的：
   (a) 100%　(b) 25%　(c) 50%　(d) 31.3%
8. 某一个分压器的无负载输出是 9 V。若连接一个负载，那么输出电压将：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 保持不变　(d) 变为零
9. 某一个分压器是由两个 10 kΩ 的电阻串联构成的，以下哪个负载电阻对输出电压有最大的影响？
   (a) 1.0 MΩ　(b) 20 kΩ　(c) 100 kΩ　(d) 10 kΩ
10. 分压器电路的输出接一个负载电阻，则电源电流将：
    (a) 增加　(b) 减少　(c) 保持不变　(d)断开
11. 在梯形网络中，应该首先简化：
    (a) 电源　(b) 离电源最远的电阻　(c) 中点　(d) 离电源最近的电阻

12. 在一个四级 $R/2R$ 的梯形网络中,最小的电阻值是 10 kΩ,最大的电阻值是:

(a) 不能确定 (b) 20 kΩ (c) 50 kΩ (d) 100 kΩ

13. 平衡的惠斯通电桥的输出电压是:

(a) 等于电源电压 (b) 等于零 (c)取决于电桥中的所有电阻 (d)取决于电桥中的未知电阻

14. 某个惠斯通电桥中的阻值如下:$R_V = 8$ kΩ, $R_2 = 680$ Ω, $R_4 = 2.2$ kΩ,则未知电阻是:

(a) 2473 Ω (b) 25.9 kΩ (c) 187 Ω (d) 2890 Ω

15. 一个电路中,测得某个电阻值很高的给定点的电压比它应有的电压低,很可能是因为:

(a) 一个或几个电阻断开 (b) 电压表负载的影响 (c) 电源电压太低 (d) 以上都是

故障检修测验

参考图 7.62(b)

1. 如果 R_2 开路,那么总电流将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

2. 如果 R_3 开路,那么通过 R_2 的电流将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

3. 如果 R_4 开路,那么 R_4 上的电压将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

4. 如果 R_4 开路,那么总电流将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

参考图 7.64

5. 如果 R_{10} 开路,点 A 和点 B 之间加上 10 V 的电压,那么总电流将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

6. 如果 R_1 开路,点 A 和点 B 之间加上 10 V 的电压,那么 R_1 上的电压将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

7. 如果 R_3 的左端和 R_5 的底端连接短路,那么点 A 和点 B 之间的总电流将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

参考图 7.68

8. 如果 R_4 开路,那么点 C 上的电压将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

9. 如果点 D 到地短路,那么点 A 和点 B 之间的电压将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

10. 如果 R_5 开路,那么通过 R_1 的电流将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

参考图 7.74

11. 如果点 A 和点 B 的输出之间连接一个 10 kΩ 的负载电阻,那么输出电压将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

12. 如果将第 11 题中连接的 10 kΩ 的负载电阻换成 100 kΩ 的,那么输出电压将:

(a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

参考图 7.75

13. 如果开关 V_2 和 V_3 端短路，那么对地电压 V_1 将：

    (a) 增加　(b) 减少　(c) 保持不变

14. 如果开关的位置如图所示，V_3 端和地短路，那么通过 R_L 的电压将：

    (a) 增加　(b) 减少　(c) 保持不变

15. 如果开关的位置如图所示，R_4 开路，那么通过 R_L 的电压将：

    (a) 增加　(b) 减少　(c) 保持不变

参考图 7.80

16. 如果 R_4 开路，那么 V_{OUT} 将：

    (a) 增加　(b) 减少　(c) 保持不变

17. 如果 R_7 和地短路，那么 V_{OUT} 将：

    (a) 增加　(b) 减少　(c) 保持不变

习题(较难的题目标有星号，题号为单数的习题答案在本书最后)

7.1 节　确定串并联关系

1. 画出以下串并联组合：

   (a) R_1 和 R_2，R_3 并联组合的串联

   (b) R_1 和 R_2，R_3 串联组合的并联

   (c) R_2 和其他 4 个电阻并联组合的串联，再和 R_1 并联

2. 画出以下串并联电路：

   (a) 三条支路的并联组合，其中每条支路含有两个串联电阻

   (b) 三条并联组合的串联，每个并联组合有两个电阻

3. 如图 7.62 所示，从电源出发，确定电阻的串并联关系。

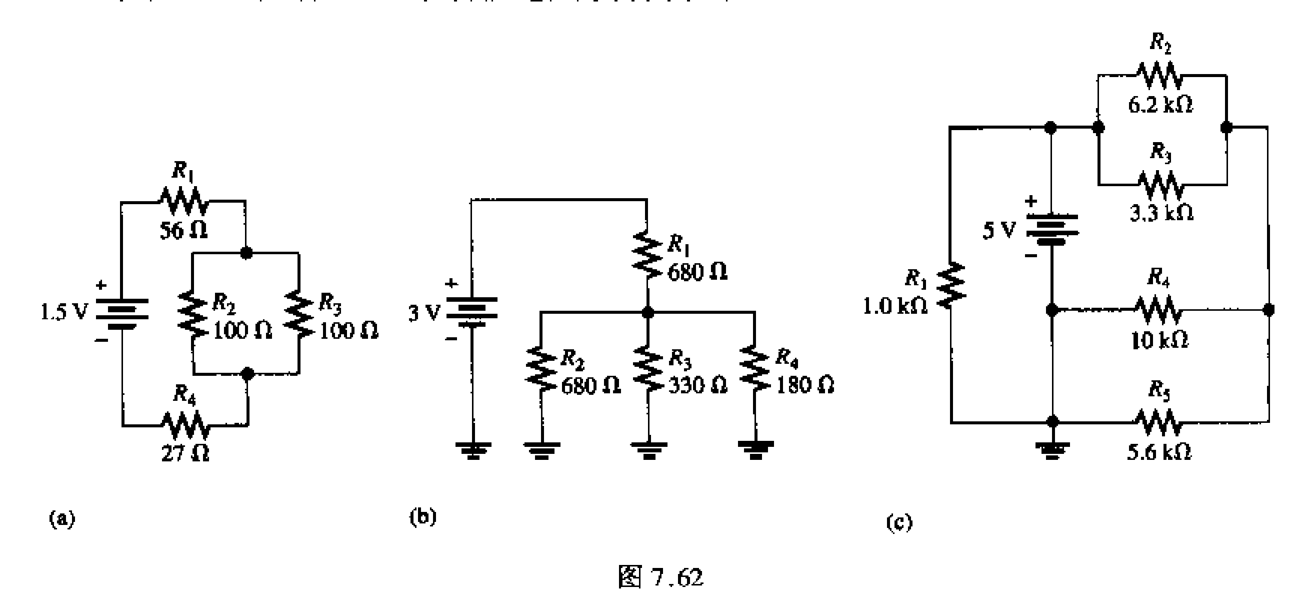


图 7.62

4. 图 7.63 所示的每个电路中，从电源出发，确定电阻的串并联关系。

5. 画出图 7.64 所示的 PC 板上排列的原理图，标明电阻值并确定电阻的串并联关系。

*6. 画出图 7.65 所示的双面 PC 板的原理图，并标上电阻值。

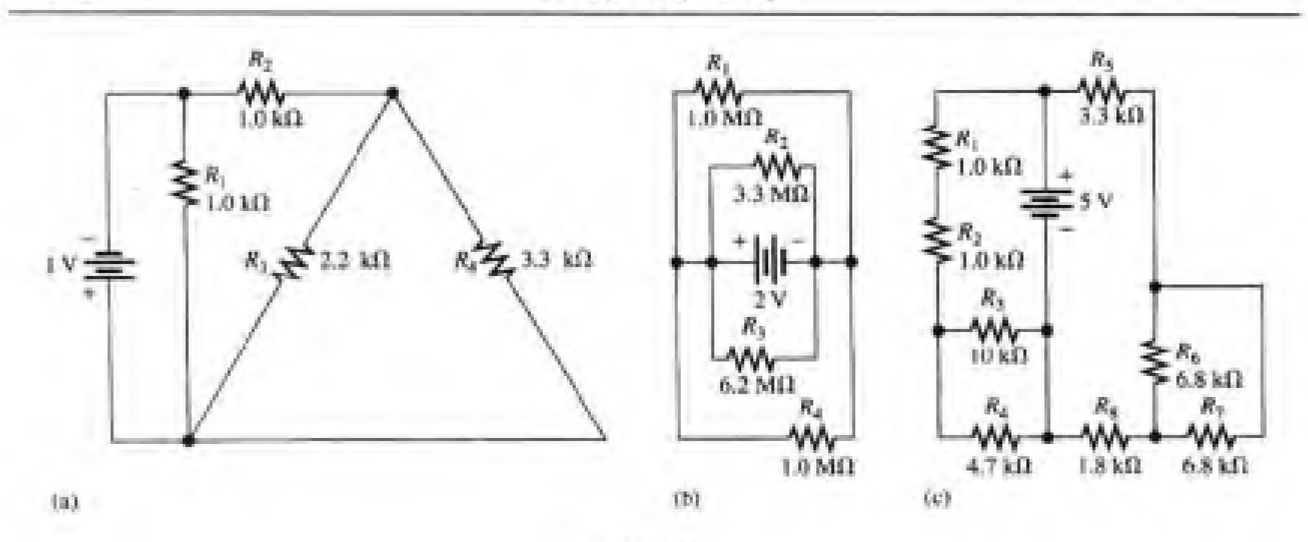


图 7.63

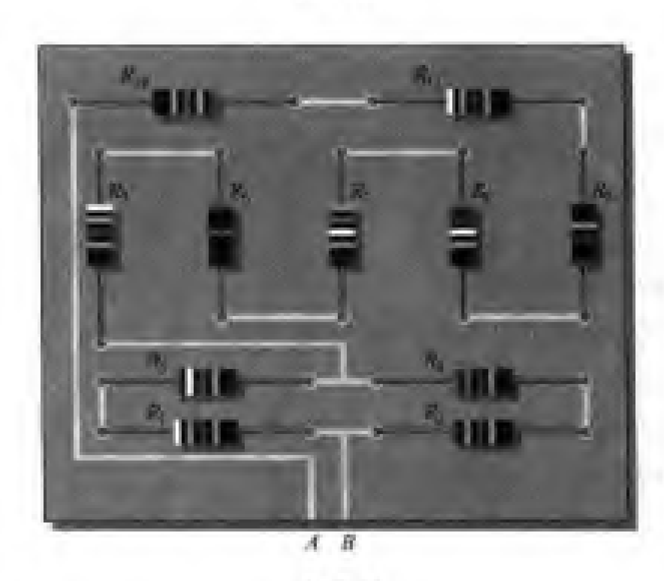


图 7.64

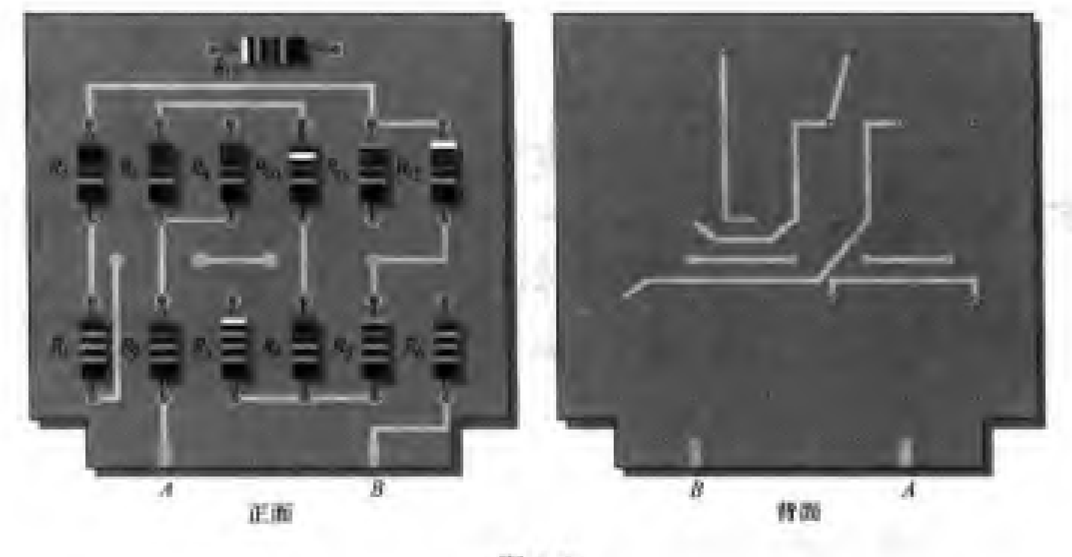


图 7.65

*7. 如图 7.63(c)所示,设计电路的 PC 板,其中电源从板的外部连接。

7.2节　串并联电路分析

8. 一个电路由两个并联电阻组成。已知总电阻是667 Ω，一个电阻是1.0 kΩ，则另一个电阻是多少？
9. 如图7.62所示的每个电路，求对电源而言的总电阻是多少？
10. 如图7.63所示的每个电路，求对电源而言的总电阻是多少？
11. 如图7.62所示的每个电路，确定通过每个电阻的电流，并计算每个电阻上的电压降是多少？
12. 如图7.63所示的每个电路，确定通过每个电阻的电流，并计算每个电阻上的电压降是多少？
13. 电路如图7.66所示，求开关在每种不同位置的组合时，R_T 是多少？
14. 电路如图7.67所示，移开电源，求点 A 和点 B 之间的电阻是多少？
15. 电路如图7.67所示，求每点的对地电压是多少？
16. 电路如图7.68所示，求每点的对地电压是多少？
17. 图7.68中，不用电压表通过电阻直接测量，如何求 R_2 上的电压？

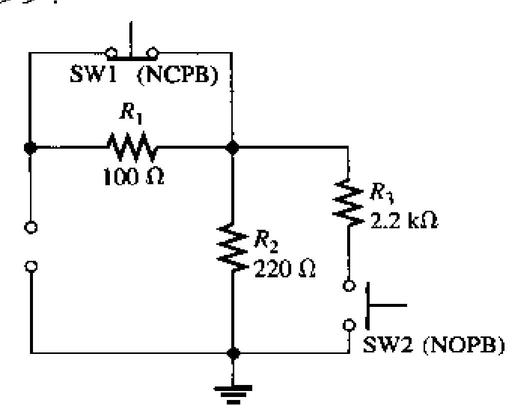


图7.66

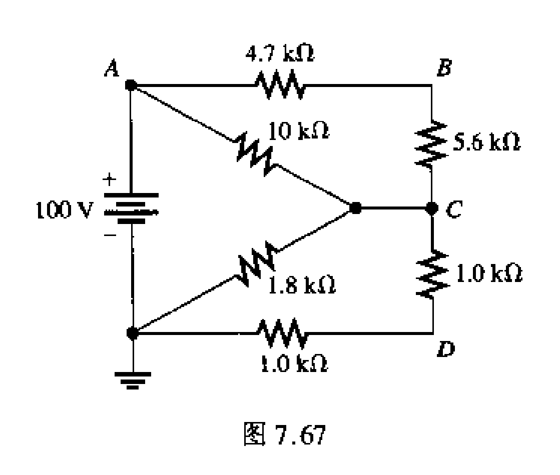


图7.67

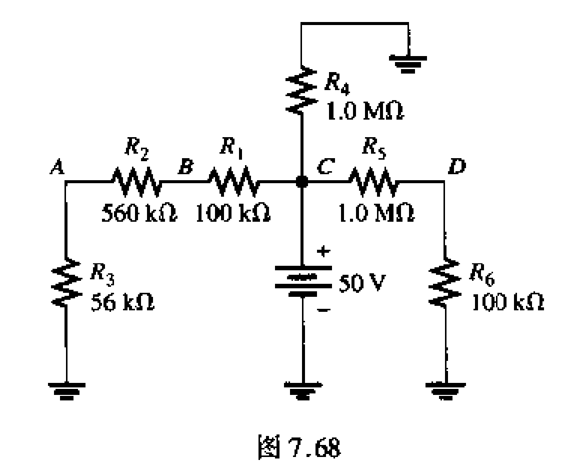


图7.68

18. 已知电路如图7.69所示，求电压 V_{AB} 是多少？
19. 已知电路如图7.70所示，求电阻 R_2 是多少？

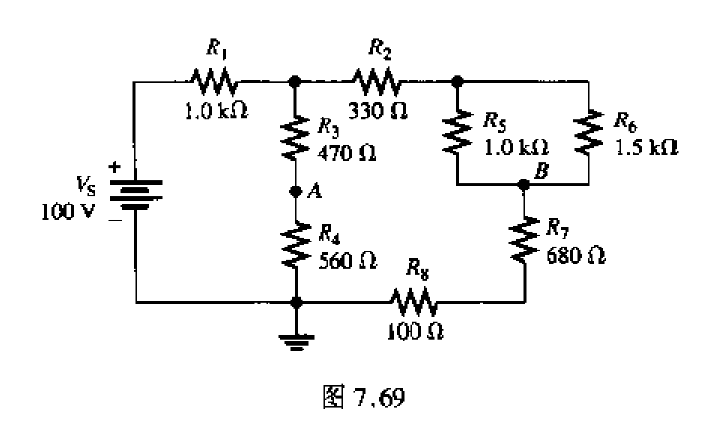


图7.69

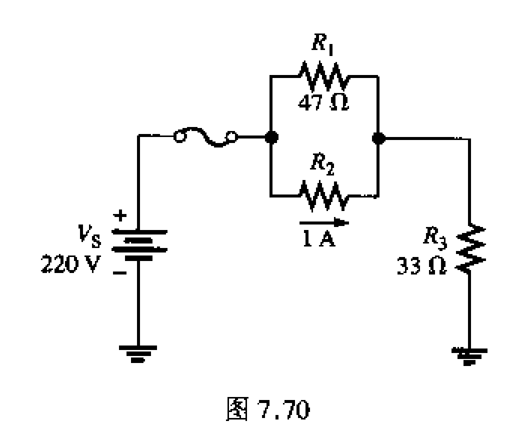


图7.70

*20. 已知电路如图7.71所示，求点 A 和其他各点之间的电阻（R_{AB}，R_{AC}，R_{AD}，R_{AE}，R_{AF} 和 R_{AG}）是多少？

*21. 已知电路如图7.72所示，求以下各点之间的电阻：A 与 B，B 与 C 及 C 与 D。

*22. 已知电路如图7.73所示，求每个电阻是多少？

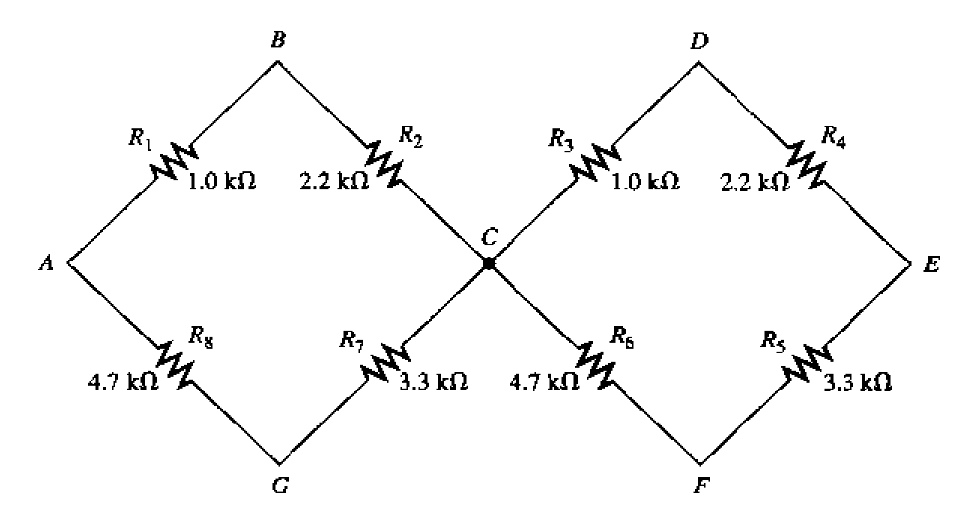


图 7.71

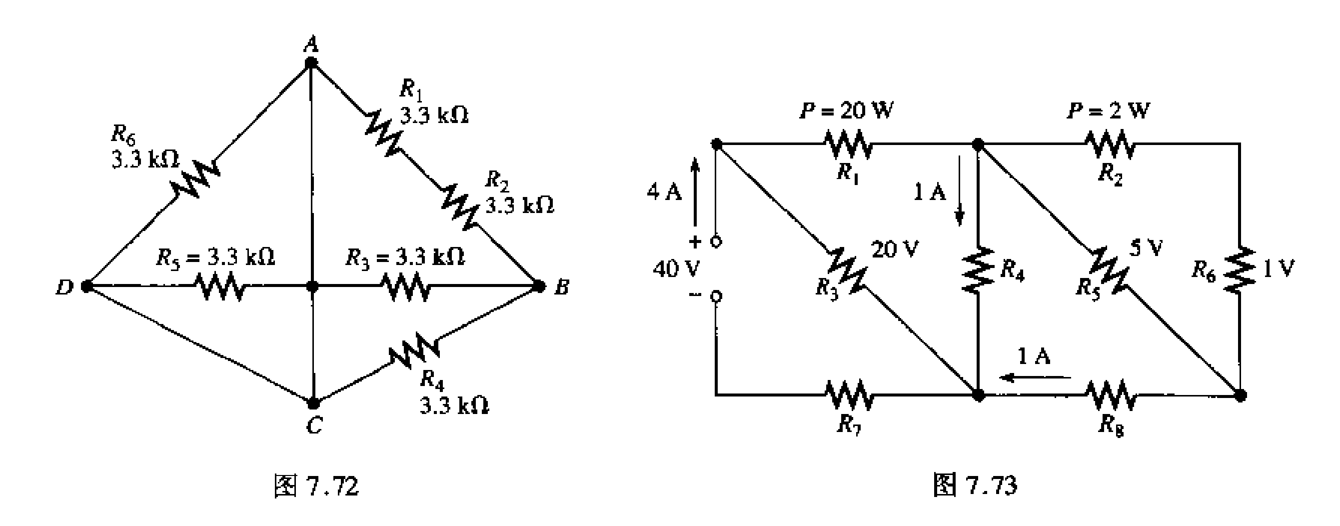


图 7.72　　图 7.73

7.3 节　有电阻负载的分压器

23. 已知一个分压器由一个 15 V 的电源和两个 56 kΩ 的电阻构成,求无负载的输出电压是多少? 若有一个 1.0 MΩ 的负载电阻连至输出,则输出电压是多少?
24. 一个 12 V 的电池组分两路输出电压。三个 3.3 kΩ 的电阻提供两个触点,求输出电压是多少? 若一个 10 kΩ 负载连至两输出中电压较高的那个,则负载值是多少?
25. 为给定的分压器加一个 10 kΩ 的负载或一个 47 kΩ 的负载,哪一个使输出电压减少较小?
26. 如图 7.74 所示,输出端无负载时,求电源的恒定电流是多少? 若有一个 10 kΩ 的负载,电池组的电流是多少?
* 27. 求分压器的电阻值,以满足以下的要求:无负载条件时的电流不超过 5 mA,电源电压是 10 V,要求输出电压是 5 V 和 2.5 V,画出电路草图。若一次给一个触点连接一个 1.0 kΩ 的负载,求对输出电压的影响?
28. 如图 7.75 所示,分压器有一个开关负载。求开关在每个位置时,每个触点(V_1, V_2 和 V_3)上的电压是多少?
* 29. 图 7.76 所示的是一个场效应晶体管放大器的直流偏压装置。偏压是提供适当放大的一定直流电压值的一种常见方法。尽管现在读者可能还不熟悉晶体管放大器,但用已知方法可以确定电路中的直流电压和电流。

(a) 求 V_G 和 V_S　　(b) 求 I_1, I_2, I_D 和 I_S　　(c) 求 V_{DS}和 V_{DC}

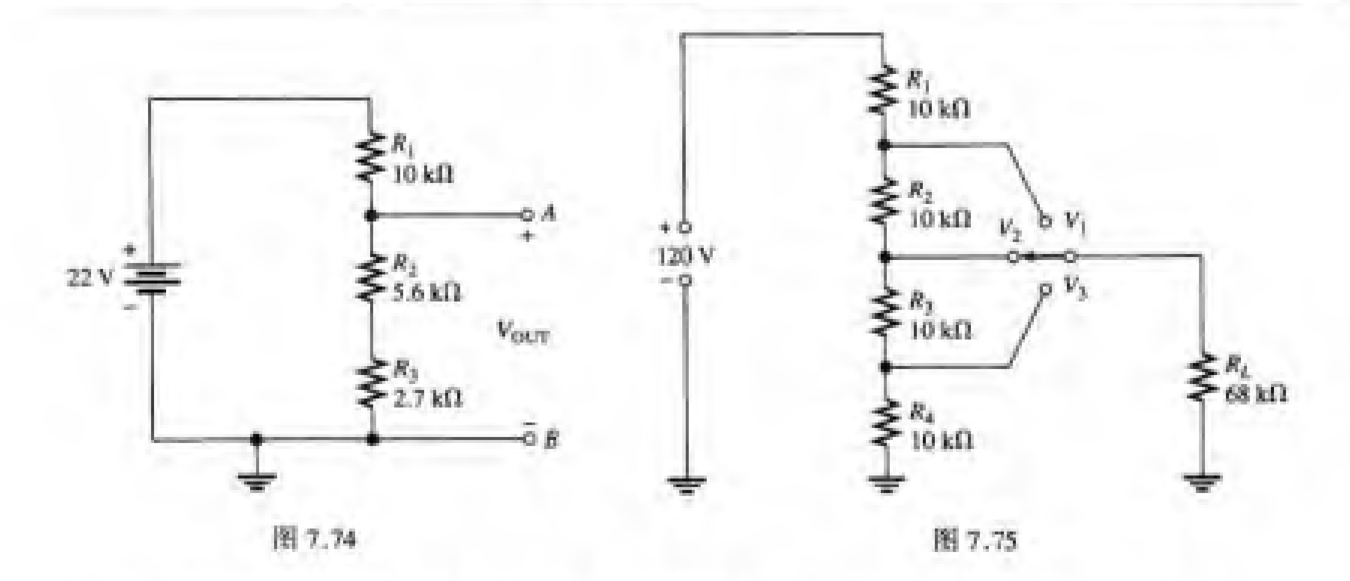


图7.74　　　　图7.75

*30. 设计一个分压器，无负载时提供6 V的输出，加1.0 kΩ负载时的最小输出是5.5 V。电源电压是24 V，无负载电流不超过100 mA。

7.4节　电压表的负载效应

31. 电压表作为电路负载，选择以下哪个量程时，负载是最小的？

(a) 1 V　(b) 10 V

(c) 100 V　(d) 1000 V

32. 求一个20 000 Ω/V电压表在以下范围设置时的内阻：

(a) 0.5 V　(b) 1 V　(c) 5 V

(d) 50 V　(e) 100 V　(f) 1000 V

33. 电压表如习题32中所描述的，用来测量图7.62(a)中R_4的电压。

(a) 应该用什么范围？

(b) 用电压表测量所得的值比实际电压值少多少？

34. 用电压表测量图7.62(b)中R_4的电压。问题同习题33。

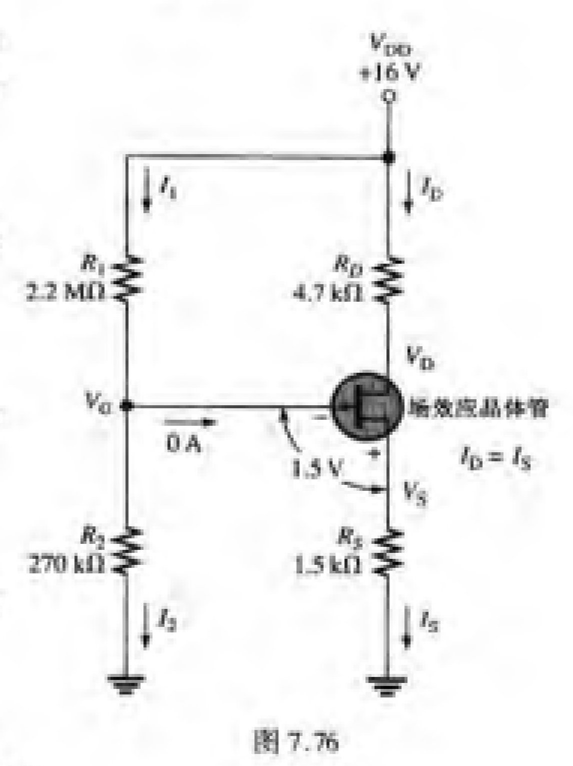


图7.76

7.5节　梯形网络

35. 电路如图7.77所示，计算下列值：

(a) 电源的总电阻　(b) 电源流出的总电流

(c) 通过910 Ω电阻的电流　(d) 点A到点B的电压

36. 梯形网络电路如图7.78所示，求点A、点B和点C的总电阻和两端电压分别是多少？

*37. 图7.79所示的梯形网络电路中，求点A和点B之间的总电阻是多少？若点A和点B之间的电压是10 V，求每条支路的电流各是多少？

38. 图7.79所示的梯形网络电路中，已知点A和点B之间的电压是10 V，求通过每个电阻的电压是多少？

图 2.77

图 2.78

图 7.79

* 39. 电路图 7.80 所示，求 I_T 和 V_{OUT} 是多少？

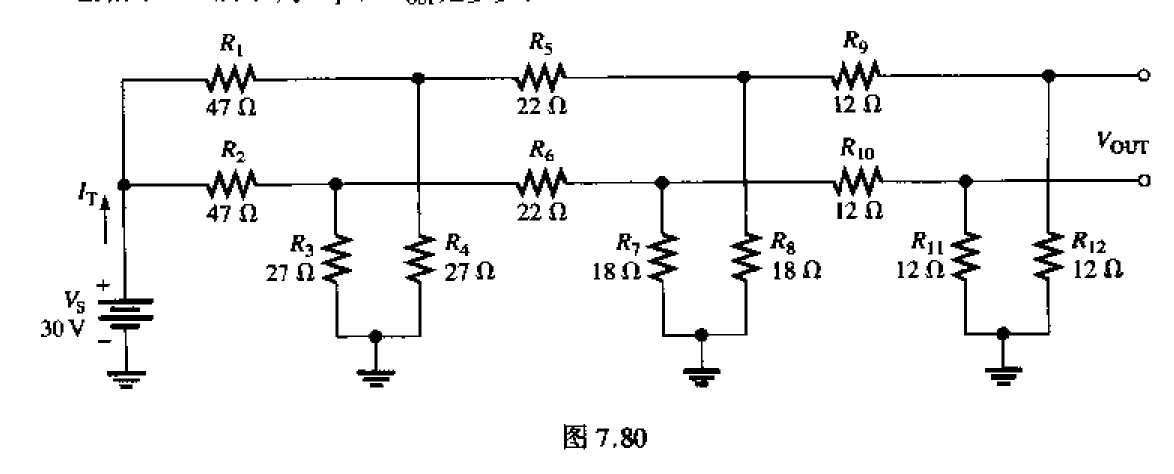


图 7.80

40. 电路如图 7.81 所示，根据以下条件，求 $R/2R$ 梯形网络的输出电压 V_{OUT} 是多少？

(a) 开关 SW2 连接到 + 12 V，其余接地。

(b) 开关 SW1 连接到 + 12 V，其余接地。

41. 根据以下条件，求 $R/2R$ 梯形网络的输出电压 V_{OUT} 是多少？

(a) 开关 SW3 和 SW4 连接到 + 12 V，SW1 和 SW2 接地。

(b) 开关 SW3 和 SW1 连接到 + 12 V，SW2 和 SW4 接地。

(c) 所有的开关接到 + 12 V。

7.6 节 惠斯通电桥

42. 一个未知阻值的电阻连到惠斯通电桥电路。平衡条件下的电桥参数如下：$R_V = 18\ \text{k}\Omega$，$R_2/R_4 = 0.02$，问 R_X 是多少？

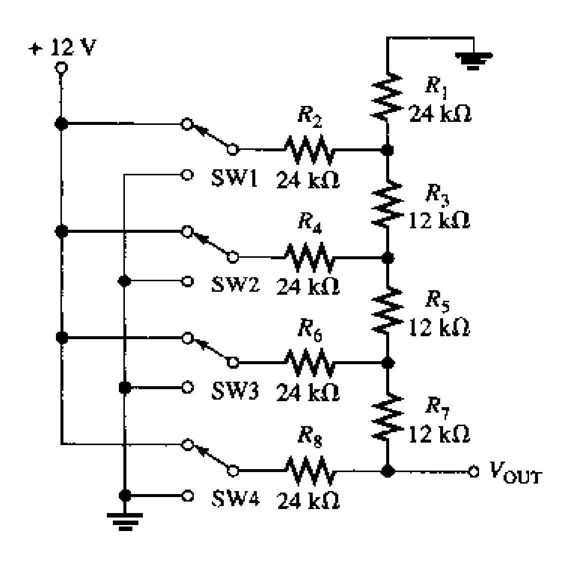


图 7.81

43. 电桥网络如图 7.82 所示，为使电桥平衡，R_V 的阻值应该是多少？

44. 图 7.83 所示的不平衡电桥中，温度为 65 ℃，求输出电压是多少？25 ℃时，热敏电阻的阻值是 1 kΩ，假设温度每改变 1℃，阻值随着改变 5 Ω。

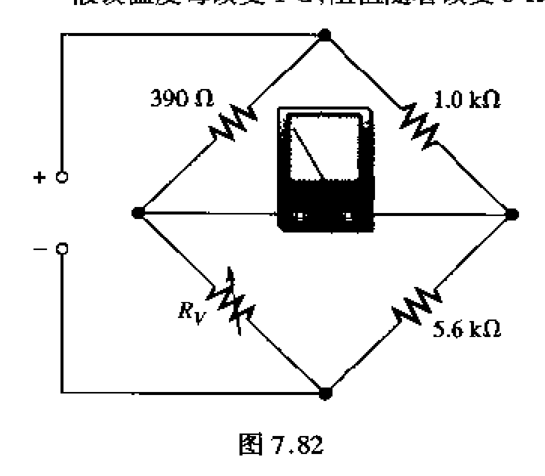


图 7.82

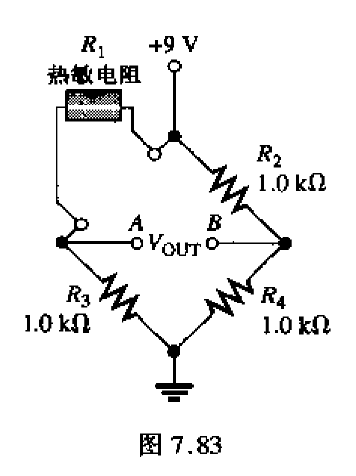


图 7.83

7.7 节　故障检修

45. 图 7.84 所示电压表的读数是否正确？

46. 图 7.85 所示电压表的读数是否正确？

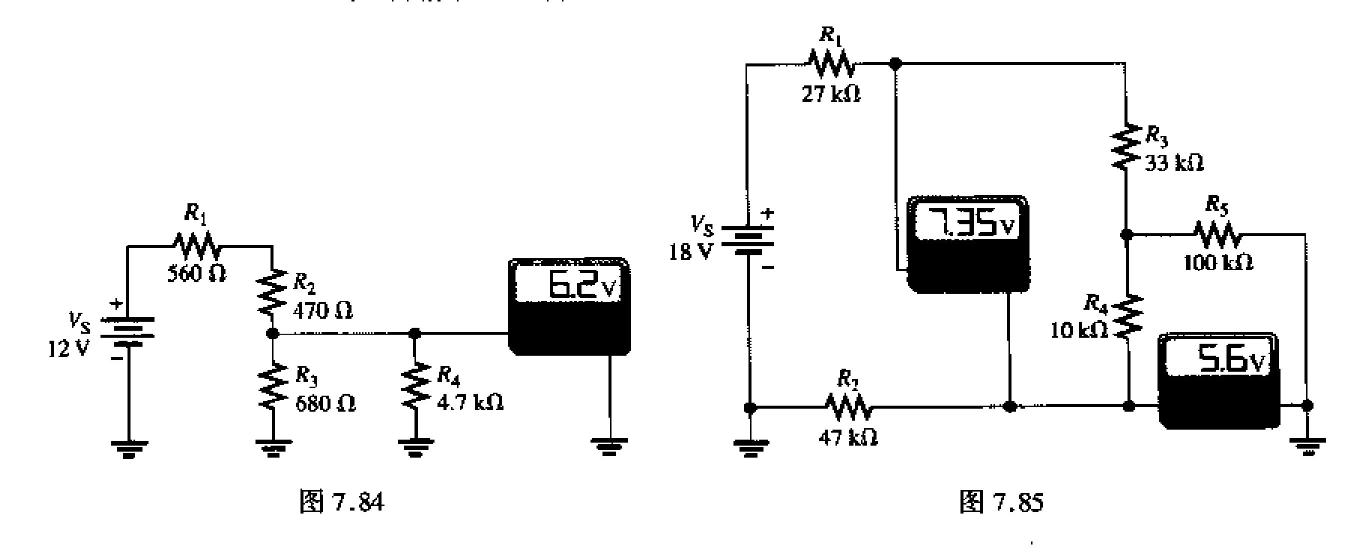


图 7.84　　图 7.85

47. 如图 7.86 所示,电路中有故障,试根据电压表的读数分析故障位置。

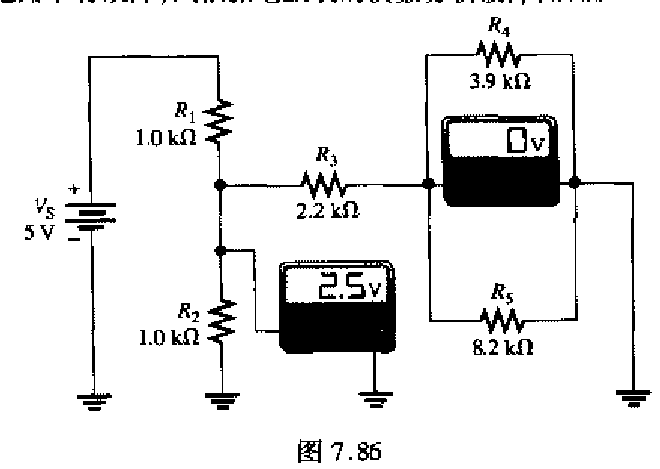


图 7.86

48. 如图 7.87 所示,根据电压表的读数判断电路中是否有故障。如果有,试分析故障位置。

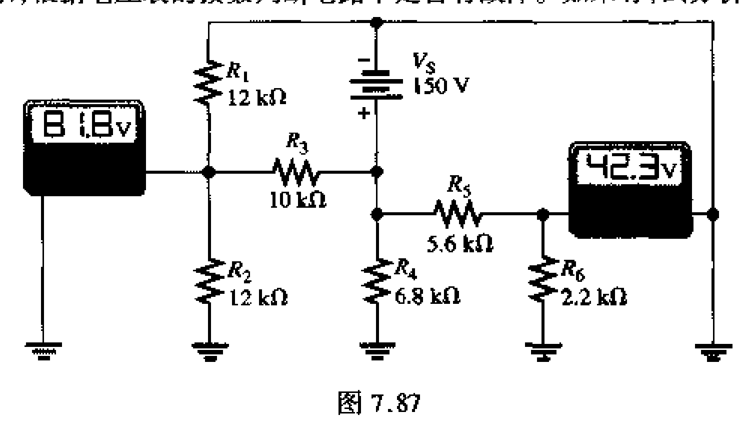


图 7.87

49. 电路如图 7.88 所示,检查电压表的读数,指出可能存在的故障。

50. 电路如图 7.89 所示,若 R_2 开路,则点 A,点 B 和点 C 的电压分别是多少?

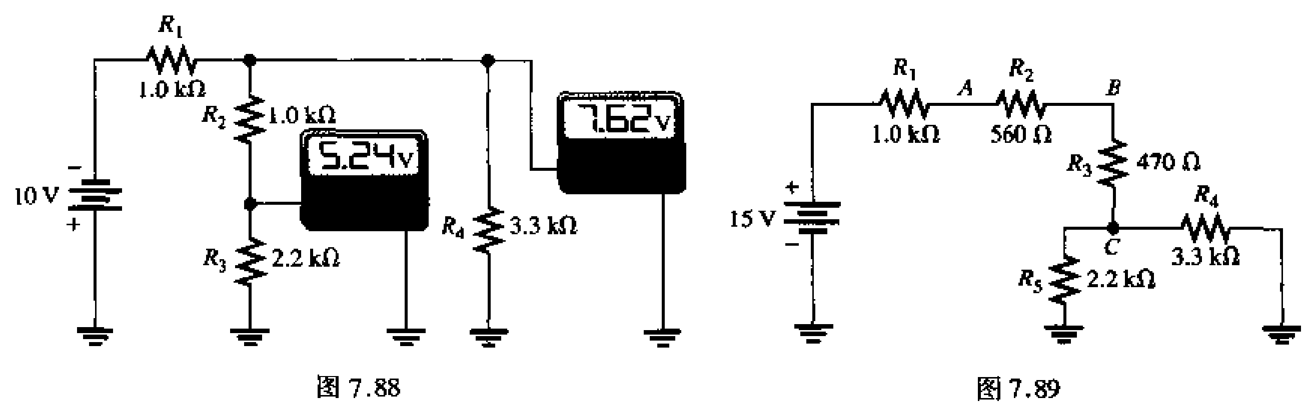


图 7.88　　　　图 7.89

EWB/Multisim 故障检修

利用本书附带的 EWB/Multisim 的光盘,回答下面的问题。

51. 打开文件 P07.51,测量总电阻。

52. 打开文件 P07.52,根据测量值判断是否有一个电阻开路,如果有,是哪一个?

53. 打开文件 P07.53,求未标识的电阻阻值。

54. 打开文件 P07.54,求负载电阻对每个电阻电压的影响。

55. 打开文件 P07.55,判断是否有一个电阻短路,如果有,是哪一个?

56. 打开文件 P07.56,调节 R_X 的阻值大小,直到电桥近似平衡。

答案

7.1 节　确定串并联关系

1. 串并联的电阻电路是一个由串联和并联组合而成的电路。
2. 参见图 7.90。

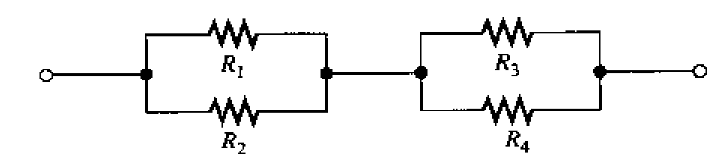


图 7.90

3. 电阻 R_1 和 R_2 的串联与 R_3 和 R_4 并联组合。
4. R_3, R_4 和 R_5 是并联。串并联的组合 $R_2+(R_3 \parallel R_4 \parallel R_5)$ 和 R_1 也是并联。
5. R_1 和 R_2 是并联，R_3 和 R_4 也是并联。
6. 是的，并联组合相串联。

7.2 节　串并联电路的分析

1. 分压和分流的公式、基尔霍夫定律和欧姆定律都可以用于串并联的分析。
2. $R_T = R_1 + R_2 \parallel R_3 + R_4 = 608\ \Omega$
3. $I_3 = [R_2/(R_2+R_3)]I_T = 11.1\ \text{mA}$
4. $V_2 = I_2 R_2 = 3.65\ \text{V}$
5. $R_T = 47\ \Omega + 27\ \Omega + (27\ \Omega + 27\ \Omega) \parallel 47\ \Omega = 99.1\ \Omega$; $I_T = 1\ \text{V}/99.1\ \Omega = 10.1\ \text{mA}$

7.3 节　带电阻负载的分压器

1. 负载电阻减小了输出电压。
2. 对。
3. $V_{OUT(unloaded)} = (100\ \text{k}\Omega/147\ \text{k}\Omega)30\ \text{V} = 20.4\ \text{V}$; $V_{OUT(loaded)} = (9.1\ \text{k}\Omega/56.1\ \text{k}\Omega)30\ \text{V} = 4.87\ \text{V}$

7.4 节　电压表的负载效应

1. 电路中连入一个电压表作为负载，是因为电压表的内阻与电路电阻并联，减小了电路两点之间的电阻，从电路分出一路电流。
2. 不能，因为电压表的内阻远大于 1.0 kΩ。
3. 是。

7.5 节　梯形网络

1. 参见图 7.91。
2. $R_T = 11.6\ \text{k}\Omega$
3. $I_T = 10\ \text{V}/11.6\ \text{k}\Omega = 859\ \mu\text{A}$
4. $I_2 = 640\ \mu\text{A}$
5. $V_A = 1.41\ \text{V}$

7.6 节　惠斯通电桥

1. 参见图 7.92。
2. $V_A = V_B$ 时电桥平衡；也就是 $V_{OUT} = 0$。
3. $R_X = 15\ \text{k}\Omega$
4. 不平衡电桥用于测量传感器的数量。

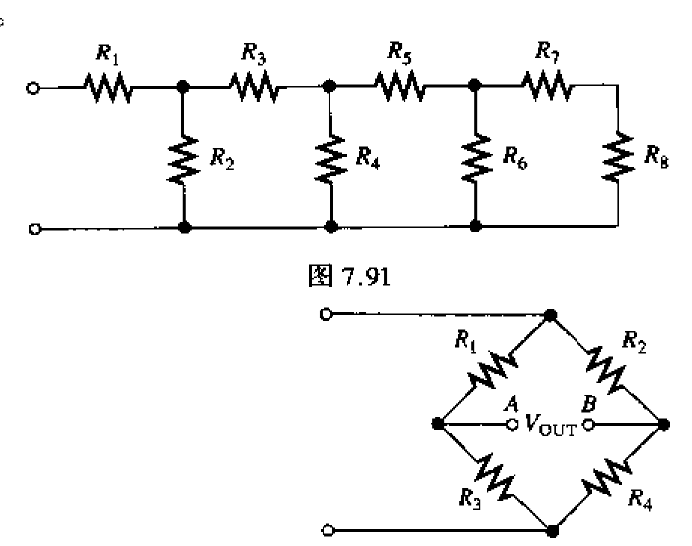


图 7.91

图 7.92

7.7 节 故障检修

1. 电路的故障通常是开路和短路。
2. 10 kΩ 的电阻(R_3)是开路的。
3. (a) $V_A = 55$ V (b) $V_A = 55$ V (c) $V_A = 54.2$ V (d) $V_A = 100$ V (e) $V_A = 0$ V

技术实践

1. 电池可以使用 413 天。
2. 是的,可以用 1/8 W 的电阻。
3. 不,没有一个电阻会过热。

实例相关练习

7.1 新电阻是和 $R_4 + R_2 \parallel R_3$ 并联。

7.2 电阻短路,所以不起作用。

7.3 新电阻和 R_5 并联。

7.4 A 对地:$R_T = R_4 + R_3 \parallel (R_1 + R_2)$

B 对地:$R_T = R_4 + R_2 \parallel (R_1 + R_3)$

C 对地:$R_T = R_4$

7.5 R_5 和 R_6 串联。

7.6 55.1 Ω

7.7 128.3 Ω

7.8 2.38 mA

7.9 $I_1 = 35.7$ mA; $I_3 = 23.4$ mA

7.10 $V_A = 44.8$ V; $V_1 = 35.2$ V

7.11 2.04 V

7.12 $V_{AB} = 5.48$ V; $V_{BC} = 1.66$ V; $V_{CD} = 0.86$ V

7.13 3.39 V

7.14 按比例增加 R_1, R_2 和 R_3。

7.15 5.19 V

7.16 $I_1 = 7.16$ mA; $I_2 = 3.57$ mA; $I_3 = 3.57$ mA; $I_4 = 1.74$ mA; $I_5 = 1.85$ mA;

$I_6 = 1.85$ mA; $V_A = 29.3$ V; $V_B = 17.4$ V; $V_C = 8.70$ V

7.17 3.3 kΩ

7.18 0.45 V

7.19 5.73 V;0 V

7.20 9.46 V

7.21 $V_A = 12$ V; $V_B = 13.8$ V

自测题

1.(e) 2.(c) 3.(c) 4.(c) 5.(b) 6.(a) 7.(b) 8.(b)
9.(d) 10.(b) 11.(b) 12.(b) 13.(b) 14.(a) 15.(d)

故障检修测验

1.(b) 2.(a) 3.(a) 4.(a) 5.(b) 6.(a) 7.(b) 8.(c) 9.(c)
10.(c) 11.(b) 12.(a) 13.(b) 14.(b) 15.(a) 16.(a) 17.(a)

第 8 章　电路理论和变换

引言

在前面的章节中，我们用欧姆定律和基尔霍夫定律分析了各种各样的电路。有些电路只用这些基本定律是很难分析的，需要用其他的方法来简化分析。

本章的这些理论和等效变换可以使某些类型的电路分析起来更容易。这些方法并没有取代欧姆定律和基尔霍夫定律，而是通常和这些定律结合起来用于某些特定的情况。

因为所有的电路都是由电压源或电流源驱动，所以理解这些元件怎样工作是十分重要的。叠加定理可以解决多源电路的问题。戴维南定理和诺顿定理提供的方法，可以将电路化简为一个简单的等效电路以简化分析。最大功率传递定理用于使一个给定的电路为负载提供最大功率的情况，音频放大器为喇叭提供最大功率就是其中的一个例子。三角形－星形(Δ-Y)等效变换和星形－三角形(Y-Δ)等效变换对于经常在测量物理参数(比如温度、压力和扭矩)系统中出现的桥式电路的分析，有时候是很有用的。

本章目标

- 描述直流电压源的特性
- 描述电流源的特性
- 进行源变换
- 应用叠加定理进行电路分析
- 应用戴维南定理简化电路进行分析
- 应用诺顿定理简化电路
- 应用最大功率传递定理
- 进行 Δ-Y 等效变换和 Y-Δ 等效变换

主要术语

- 电压源
- 电流源
- 端口等效
- 叠加定理
- 戴维南定理
- 诺顿定理
- 最大功率传递

技术实践

在技术实践中，我们将分析用第 7 章学过的惠斯通电桥构成的温度测量和控制电路。用戴维南定理和其他方法求解这个电路。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问：http://www.prenhall.com/floyd。

8.1　直流电压源

直流电压源是电子学应用中最重要的能源之一，所以了解其特性是十分重要的。理想电压源为负载提供不变的电压，即使负载电阻是变化的。

学完本节后读者应该能够：

- 描述直流电压源的特性

- 比较实际电压源和理想电压源
- 讨论实际电压源的负载特性

图 8.1(a)所示为理想电压源的常用符号。无论什么样的负载电阻接在它的输出两端上，它的两端 A 和 B 之间的电压总保持不变。图 8.1(b)连接了一个负载电阻 R_L。全部的电源电压 V_S 都加在负载电阻 R_L 的两端。理想情况下，R_L 可以变成任何非零值，而电压保持不变。理想电压源的内阻为零。

实际上并没有理想的电压源。也就是说，所有的电压源基于物理和化学结构都有固有的内阻，这可以表示为一个与理想电压源串联的电阻，如图 8.2(a)所示。R_S 为电压源内阻，V_S 为源电压。无外接电阻时，输出电压(A 到 B 的电压)为 V_S。这个电压有时称为开路电压。

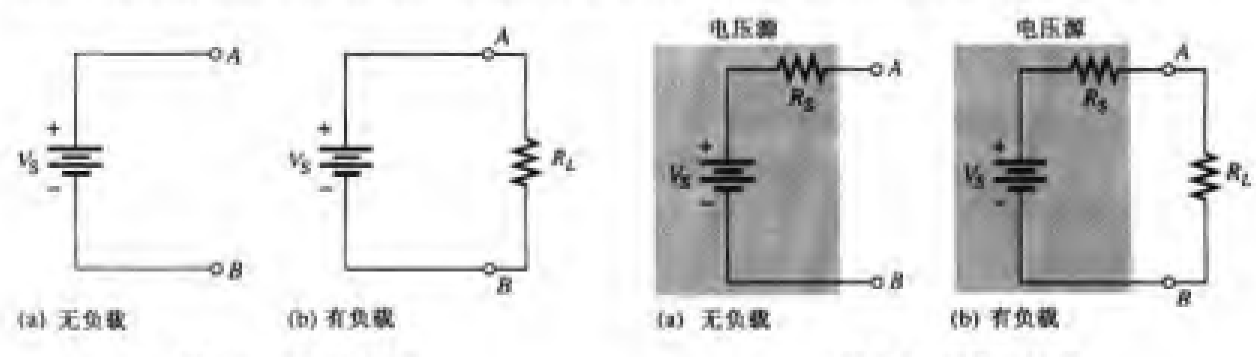


图 8.1 理想电压源　　图 8.2 实际电压源

8.1.1 电压源的负载特性

当一个负载电阻连接到输出端时，如图 8.2(b)所示，并不是全部的源电压都加在 R_L 上。因为 R_S 和 R_L 串联，所以一部分电压加在了 R_S 上。

如果 R_S 比 R_L 小很多，那么电源接近理想情况，几乎所有的电源电压 V_S 都加在电阻 R_L 上，内阻 R_S 两端的电压降很小。如果 R_L 变化，只要 R_L 比 R_S 大很多，输出端就仍保持绝大部分电源电压。所以输出电压的变化很小。与 R_S 相比，R_L 越大，输出电压的变化就越小。

例 8.1 表明当 R_L 比 R_S 大很多时，R_L 的变化对输出电压的影响。例 8.2 表明了较小负载电阻的影响。

例 8.1　图 8.3 中，计算当 R_L 取值为 100 Ω、560 Ω 和 1.0 kΩ 时，电源电压的输出值。

解：当 $R_L = 100\ \Omega$ 时，输出电压为：

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_L}{R_S + R_L}\right)V_S = \left(\frac{100\ \Omega}{110\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{90.9\ V}$$

当 $R_L = 560\ \Omega$ 时，

$$V_{OUT} = \left(\frac{560\ \Omega}{570\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{98.2\ V}$$

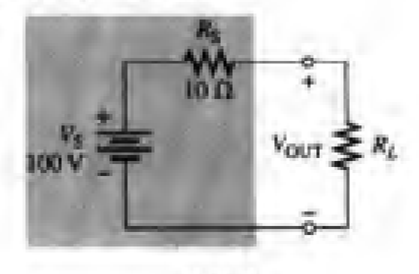


图 8.3

当 $R_L = 1.0\ \text{k}\Omega$ 时，

$$V_{OUT} = \left(\frac{1000\ \Omega}{1010\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{99.0\ V}$$

注意输出电压的变化在源电压 V_S 的 10%范围内，这是因为在 R_L 所取的 3 个值中，R_L 至少是 R_S 的 10 倍。

练习：图 8.3 中，当 $R_S = 50\ \Omega$，$R_L = 10\ \text{k}\Omega$ 时，计算 V_{OUT}。

例 8.2　图 8.3 中，计算当 $R_L = 10\ \Omega$，$R_L = 1.0\ \Omega$ 时 V_{OUT} 的值。

解：当 $R_L = 10\ \Omega$ 时，输出电压为：

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_L}{R_S + R_L}\right)V_S = \left(\frac{100\ \Omega}{20\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{50\ V}$$

当 $R_L = 1.0\ \Omega$ 时，

$$V_{OUT} = \left(\frac{1.0\ \Omega}{11\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{9.09\ V}$$

练习：图 8.3 中，无负载电阻时 V_{OUT} 为多少？

例 8.2 中，当 R_L 相对于 R_S 变得更小时，输出电压明显降低。此例说明为保持输出电压接近于其开路电压，必须要求 R_L 远大于 R_S。

8.1 节练习

1. 理想电压源的符号是什么？
2. 画出一个实际电压源。
3. 理想电压源的内阻是多少？
4. 对实际电压源，负载电阻对输出电压有什么影响？

8.2　电流源

电流源是对负载电阻（即使负载电阻阻值变化）提供理想恒定电流的另一种供能元件。电流源的概念对某些晶体管电路来说很重要。

学习完本节后读者应该能够：

■ 描述电流源的特性

■ 比较实际电流源和理想电流源

■ 讨论实际电流源的负载特性

图 8.4(a)所示为理想电流源的符号。箭头指明了源电流 I_S 的方向。理想电流源为负载提供恒定的电流——无论负载的值多大。图 8.4(b)中所示的负载电阻接在电流源的 A 和 B 两端，说明了这个概念。理想电流源的内阻为无穷大。

晶体管的基本作用和电流源相同，因此对电流源概念的了解是十分重要的。以后读者会发现，晶体管的等效模型中确实含有电流源。

虽然可以利用理想电流源进行绝大部分的分析工作，但实际上理想的器件并不存在。图 8.5描述了一个实际电流源，其内阻与理想电流源并联。

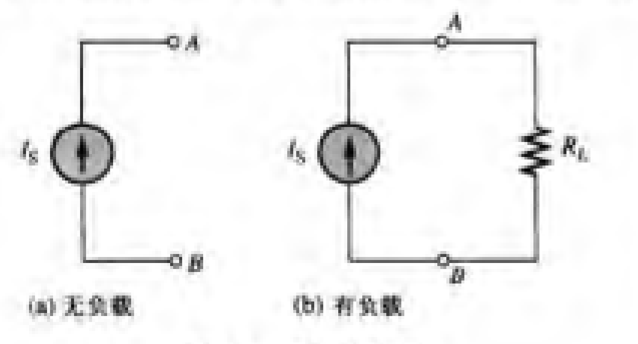


图 8.4　理想电流源

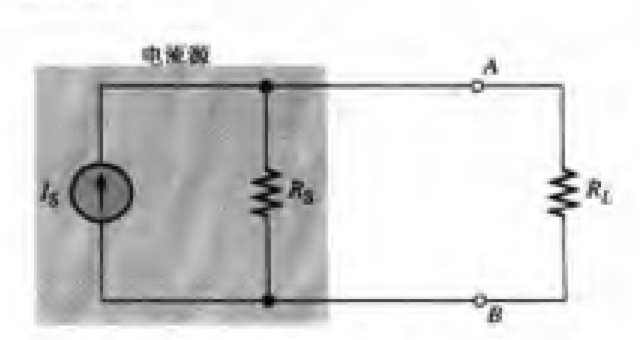


图 8.5　实际带负载的电流源

如果内阻 R_S 远大于负载电阻，则实际电流源接近理想电流源。原因如图 8.5 中的实际电流源所示。电流 I_S 的一部分流经 R_S，另一部分流经 R_L。电阻 R_S 和 R_L 起电流分流器作用。如果 R_S 远大于 R_L，则绝大部分电流流经 R_L，而只有很少的电流流经 R_S。只要 R_L 远小于 R_S，流经 R_L 的电流就为常量，而无论它变化多少。

如果存在一个常量电流源，一般可以认为负载 R_L 与 R_S 相比小到可以忽略的程度，这就将电流源简化为理想情况，使分析更简单。

例 8.3 说明当 R_L 远小于 R_S 时 R_L 的变化对负载电流的影响。一般情况下，R_S 应该至少是 R_L 的 10 倍($10R_L \leqslant R_S$)。

例 8.3 计算图 8.6 中的负载电流值，R_L 分别取以下值：100 Ω，560 Ω 和 1.0 kΩ。

解：当 $R_L = 100\ \Omega$ 时，负载电流为：

$$I_L = \left(\frac{R_S}{R_S + R_L}\right)I_S = \left(\frac{10\ \text{k}\Omega}{10.1\ \text{k}\Omega}\right)1\ \text{A} = \mathbf{990\ mA}$$

当 $R_L = 560\ \Omega$ 时，

$$I_L = \left(\frac{10\ \text{k}\Omega}{10.56\ \text{k}\Omega}\right)1\ \text{A} = \mathbf{947\ mA}$$

当 $R_L = 1.0\ \text{k}\Omega$ 时，

$$I_L = \left(\frac{10\ \text{k}\Omega}{11\ \text{k}\Omega}\right)1\ \text{A} = \mathbf{909\ mA}$$

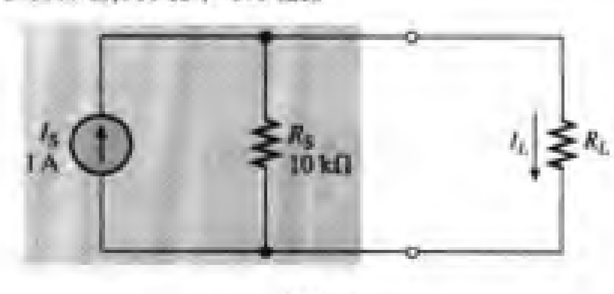


图 8.6


注意输出电流 I_L 的变化在源电流的 10% 范围内，这是因为 R_S 至少是 R_L 的 10 倍。

练习：图 8.6 中 R_L 取何值时负载电流等于 750 mA？

8.2 节练习

1. 理想电流源的符号是什么？
2. 画出一个实际电流源。
3. 理想电流源的内阻是多少？
4. 实际电流源中负载电阻对负载电流有什么影响？

8.3 源变换

在电路分析中，有些时候需要将电压源转化为等效电流源，反之亦然。

学习完本节后读者应该能够：

- 进行源变换
- 把电压源转化为电流源
- 把电流源转化为电压源
- 定义端口等效

8.3.1 将电压源转化为电流源

源电压 V_S 被源内阻 R_S 分压，可得等效电流源的输出电流值。

$$I_S = \frac{V_S}{R_S}$$

R_S 的值对电压源和电流源都是一样的。如图 8.7 所示，电流方向的箭头由负极指向正极。等效电流源与 R_S 并联。

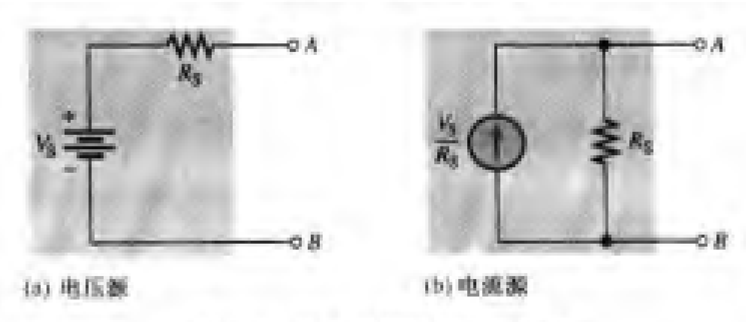


图8.7 将电压源转化为电流源

两种电源的等效意味着，对于接在电源两端的任意给定负载电阻，两种电源将提供相同的电压和电流。这一概念就叫做端口等效。

图8.7中的电压源和电流源是等效的，这可以通过在每个电源两端接入负载电阻（如图8.8所示），然后计算负载电流来证明。对电压源，负载电流为：

$$I_L=\frac{V_S}{R_S+R_L}$$

对电流源，

$$I_L=\left(\frac{R_S}{R_S+R_L}\right)\frac{V_S}{R_S}=\frac{V_S}{R_S+R_L}$$

两个电流表达式是相同的。这些方程式表明两种电源就负载或两端点 A 和 B 来说是等效的。

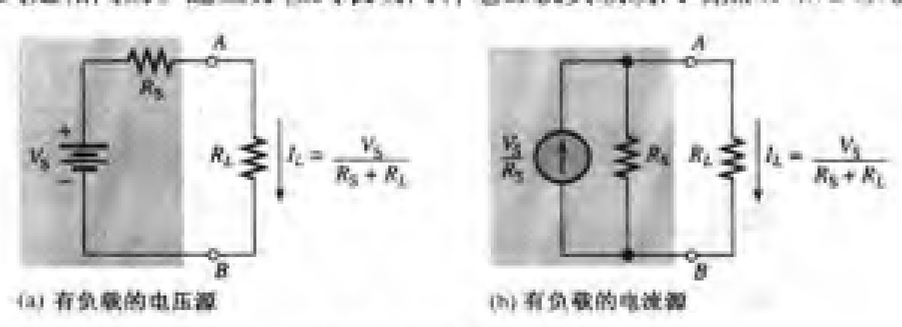


图8.8 有负载等效电源

例8.4 将图8.9中的电压源转化为等效电流源，并画出等效电路。

解： R_S 的值和电压源的相等。所以，等效电流源为：

$$I_S=\frac{V_S}{R_S}=\frac{100\ \text{V}}{47\ \Omega}=2.13\ \text{A}$$

图8.10所示为等效电路。

练习： 对于 $V_S=12$ V 和 $R_S=10\ \Omega$ 的电压源，计算其等效电流源的 I_S 和 R_S 值。

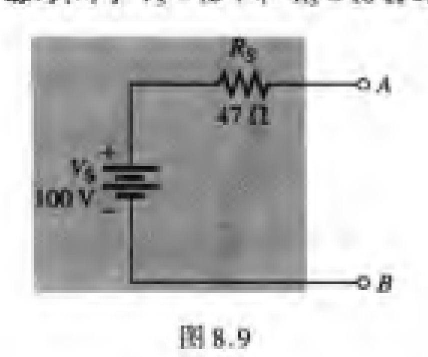


图8.9

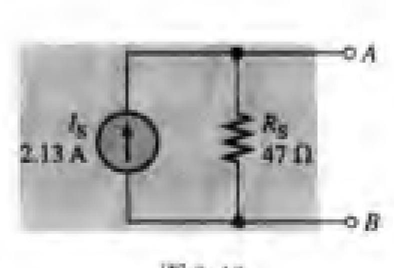


图8.10

8.3.2 将电流源转化为电压源

源电流 I_S 与源内阻 R_S 相乘,可得等效电压源的输出电压值。

$$V_S = I_S R_S$$

R_S 仍然是相同的。电压源的极性由原电流方向中的负极指向正极。等效电压源与 R_S 串联,如图 8.11 所示。

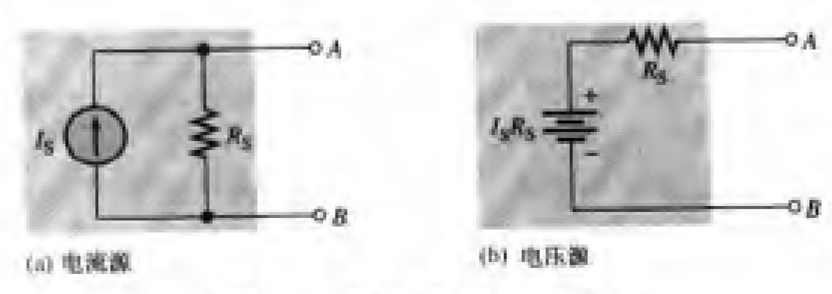


图 8.11 将电流源转化为电压源

例 8.5 将图 8.12 中的电流源转化为等效电压源,并画出其等效电路。

解: R_S 的值和电流源的相等。所以,等效电压源为:

$$V_S = I_S R_S = (10\ \text{mA})(1.0\ \text{k}\Omega) = 10\ \text{V}$$

图 8.13 所示为等效电路。

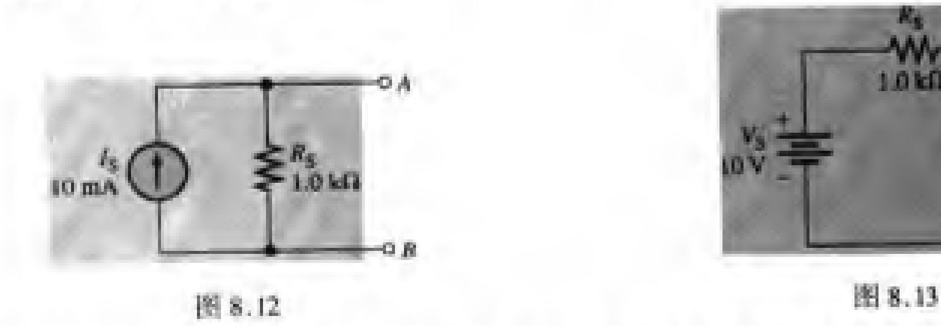


图 8.12

图 8.13

练习:对于 $I_S = 500$ mA 和 $R_S = 600\ \Omega$ 的电流源,计算其等效电压源的 V_S 和 R_S 值。

8.3 节练习

1. 写出将电压源转化为电流源的准则。
2. 写出将电流源转化为电压源的准则。
3. 将图 8.14 所示的电压源转化为等效电流源。
4. 将图 8.15 所示的电流源转化为等效电压源。

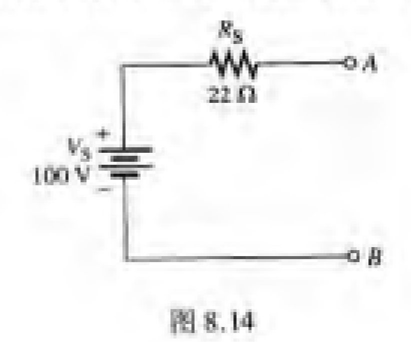


图 8.14

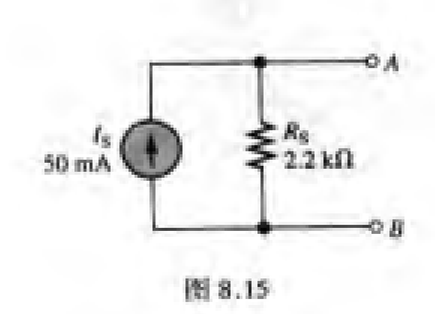


图 8.15

8.4 叠加定理

某些电路需要多个电压源或电流源。例如,大部分放大器有两个电压源:交流电压源和直流电压源。此外,某些放大器要正常工作,需要一正一负两个直流电压源。

学习完本节后读者应该能够:

- 应用叠加定理进行电路分析
- 描述叠加定理
- 列出应用此定理时的步骤

叠加方法是在多电源电路中,用一次分析一个电源的方法确定电流和电压。其他电源用其内阻代替。如前文所述,理想电压源内阻为零。为简化代替过程,所有电压源都可以当做理想的电压源来对待。

关于叠加定理的一般性描述如下:

在任何多源电路中,给定支路的电流均可以由每一个电源独立作用时确定此支路上电流的方法求出,此时其他电源由其内阻代替。支路的总电流是各个独立源在此支路上电流的代数和。

应用叠加方法的步骤如下:

第一步 一次取一个电压(电流)源,并把其他电压(电流)源中的电压源以短路代替,电流源以开路代替。(短路表示理想电源的内阻为零,开路表示其内阻为无穷大。)

第二步 假设电路中只有一个电源,确定所需的电流和电压。

第三步 取电路中的下一个电源并重复第一步和第二步。计算出每一个电源。

第四步 为得出给定支路的实际电流,算术相加每一个独立源求出的电流。(如果电流方向相同,则相加。如果电流方向相反,则将其按最终电流方向即初始值较大的电流的方向相减。)一旦求出电流,就可以确定电压了。

图 8.16 给出了一个双电源串并联电路应用叠加定理的例子。学习图中的步骤。例 8.6 至例 8.9 将进一步说明这个过程。

例 8.6 用叠加定理求出图 8.17 中流经 R_2 的电流。

解:第一步 用短路代替 V_{S2},求出由 V_{S1} 引起的流经 R_2 的电流,如图 8.18 所示。为求出 I_2,使用分流公式(6.10)。从 V_{S1} 看,

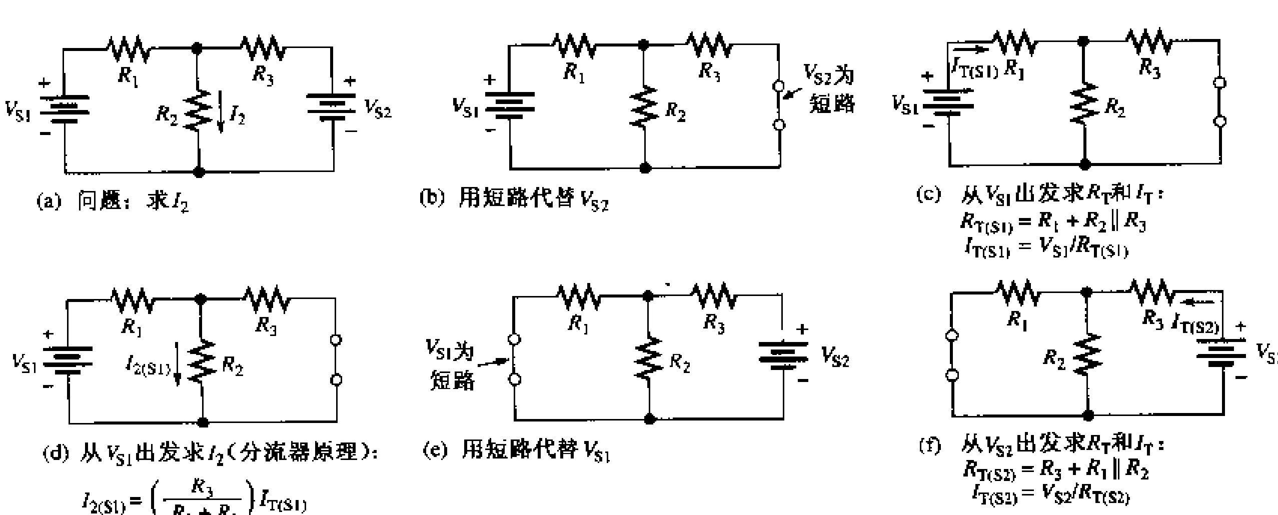
$$R_{T(S1)} = R_1 + \frac{R_3}{2} = 100\ \Omega + 50\ \Omega = 150\ \Omega$$

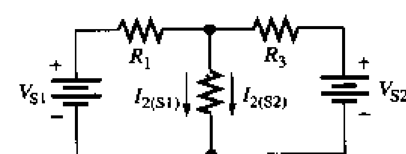
$$I_{T(S1)} = \frac{V_{S1}}{R_{T(S1)}} = \frac{10\ \text{V}}{150\ \Omega} = 66.7\ \text{mA}$$

由 V_{S1} 引起的流经 R_2 的电流为:

$$I_{2(S1)} = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) I_{T(S1)} = \left(\frac{100\ \Omega}{200\ \Omega}\right) 66.7\ \text{mA} = 33.3\ \text{mA}$$

注意此电流向下流经 R_2。





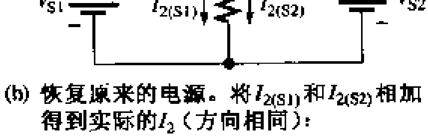


图 8.16 叠加法示意图

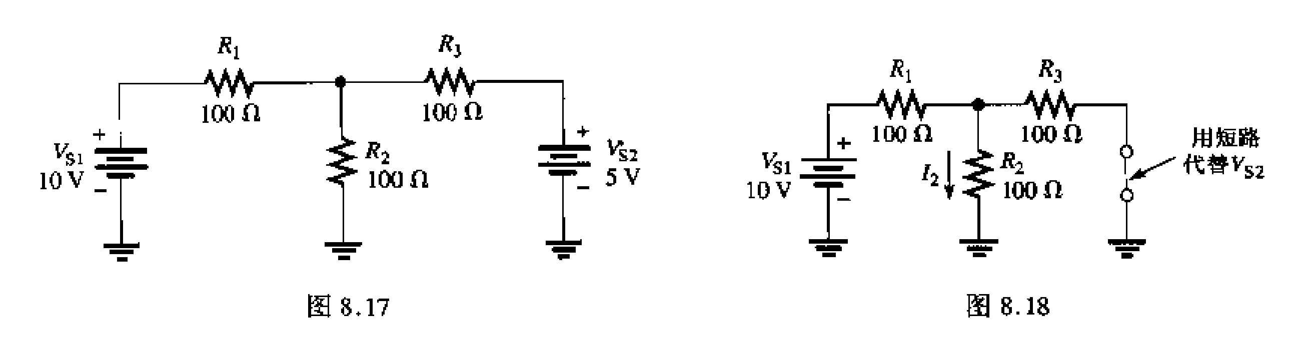


图 8.17 图 8.18

第二步 将 V_{S1} 用短路代替，并求出由 V_{S2} 引起的流经 R_2 的电流，如图 8.19 所示。从 V_{S2} 看，

$$R_{T(S2)} = R_1 + \frac{R_1}{2} = 100\ \Omega + 50\ \Omega = 150\ \Omega$$

$$I_{T(S2)} = \frac{V_{S2}}{R_{T(S2)}} = \frac{5\ \text{V}}{150\ \Omega} = 33.3\ \text{mA}$$

由 V_{S2} 引起的流经 R_2 的电流为：

$$I_{2(S2)} = \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right) I_{T(S2)} = \left(\frac{100\ \Omega}{200\ \Omega}\right) 33.3\ \text{mA} = 16.7\ \text{mA}$$

注意此电流向下流经 R_2。

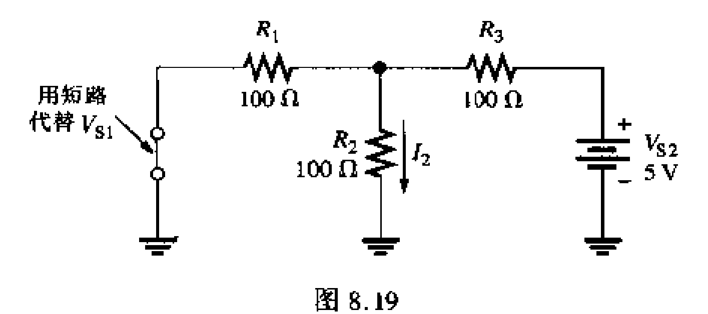


图 8.19

第三步　两个元件的电流都向下流经 R_2，所以其代数符号相同。因此，将这两个值相加即可得到流经 R_2 的总电流。

$$I_{2(tot)} = I_{2(S1)} + I_{2(S2)} = 33.3\ \text{mA} + 16.7\ \text{mA} = \mathbf{50\ mA}$$

练习：将图 8.17 中 V_{S2} 的极性反向，确定流经 R_2 的总电流。

例 8.7　求出图 8.20 所示电路中流经 R_2 的电流。

解：第一步　将 I_S 用开路代替，并求出由 V_S 引起的流经 R_2 的电流，如图 8.21 所示。

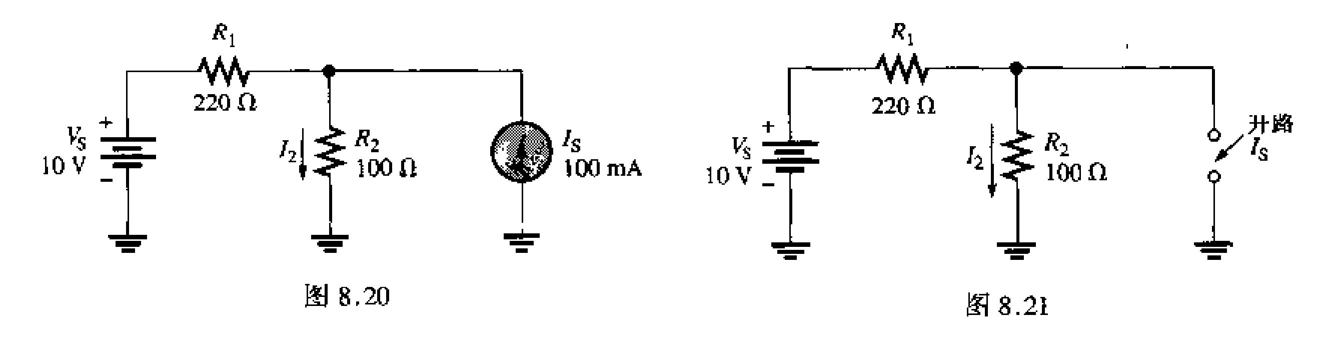


图 8.20　　图 8.21

注意 V_S 提供的所有电流都流经 R_2。从 V_S 看，

$$R_T = R_1 + R_2 = 320\ \Omega$$

由 V_S 引起的流经 R_2 的电流为：

$$I_{2(V_S)} = \frac{V_S}{R_T} = \frac{10\ \text{V}}{320\ \Omega} = 31.2\ \text{mA}$$

注意此电流向下流经 R_2。

第二步　将 V_S 用短路代替，并求出由 I_S 引起的流经 R_2 的电流，如图 8.22 所示。

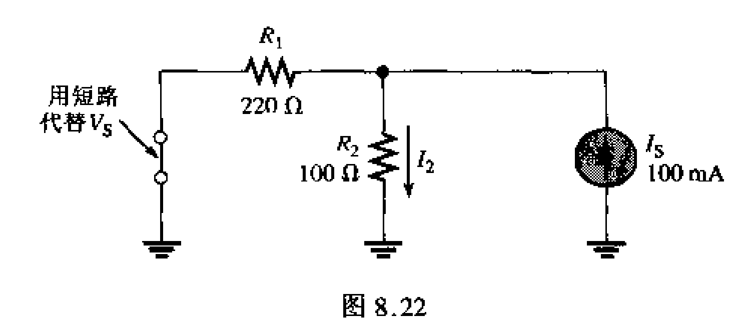


图 8.22

使用分流公式确定由 I_S 引起的流经 R_2 的电流。

$$I_{2(I_S)} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) I_S = \left(\frac{220\ \Omega}{320\ \Omega}\right) 100\ \text{mA} = 68.8\ \text{mA}$$

注意此电流亦向下流经 R_2。

第三步　两部分电流都以相同的方向流经 R_2，所以将其相加得到总电流。

$$I_{2(tot)} = I_{2(V_S)} + I_{2(I_S)} = 31.2\ \text{mA} + 68.8\ \text{mA} = \mathbf{100\ mA}$$

练习：将图 8.20 中 V_S 的极性反向，I_S 的值受何影响？

例 8.8　求出图 8.23 中流经 100 Ω 电阻的电流。

解：第一步　用开路代替电流源 I_{S2}，并求出由电流源 I_{S1} 引起的流经 100 Ω 电阻的电流，如图 8.24 所示。正如所看到的，电流源 I_{S1} 的全部 100 mA 电流都向下流经 100 Ω 电阻。

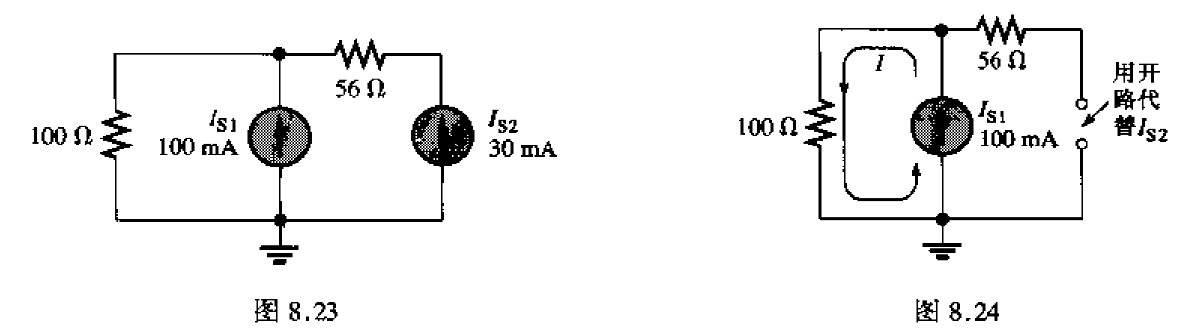


图 8.23　　图 8.24

第二步　将电流源 I_{S1} 用开路代替，并求出由电流源 I_{S2} 引起的流经 100 Ω 电阻的电流，如图 8.25 所示。电流源 I_{S2} 的全部 30 mA 电流都向上流经 100 Ω 电阻。

第三步　为得到流经 100 Ω 电阻的总电流，由于方向相反，所以用较大电流减去较小电流。结果得到的电流方向为由 I_{S1} 流出的较大电流的方向。

$$I_{100\Omega(\text{tot})} = I_{100\Omega(I_{s1})} - I_{100\Omega(I_{s2})} = 100\text{ mA} - 30\text{ mA} = \mathbf{70\text{ mA}}$$

结果得到电流向下流经电阻。

练习：如果图 8.23 中的 100 Ω 电阻变为 68 Ω，流经它的电流是多少？

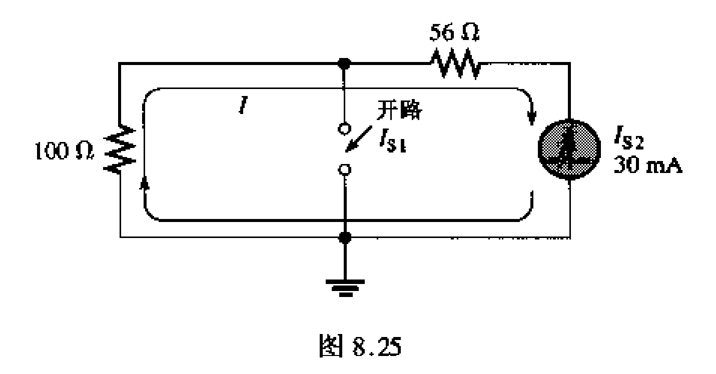


图 8.25

例 8.9　求出图 8.26 中流经 R_3 的电流。

解：第一步　将 V_{S2} 用短路代替，并求出由 V_{S1} 引起的流经 R_3 的电流，如图 8.27 所示。

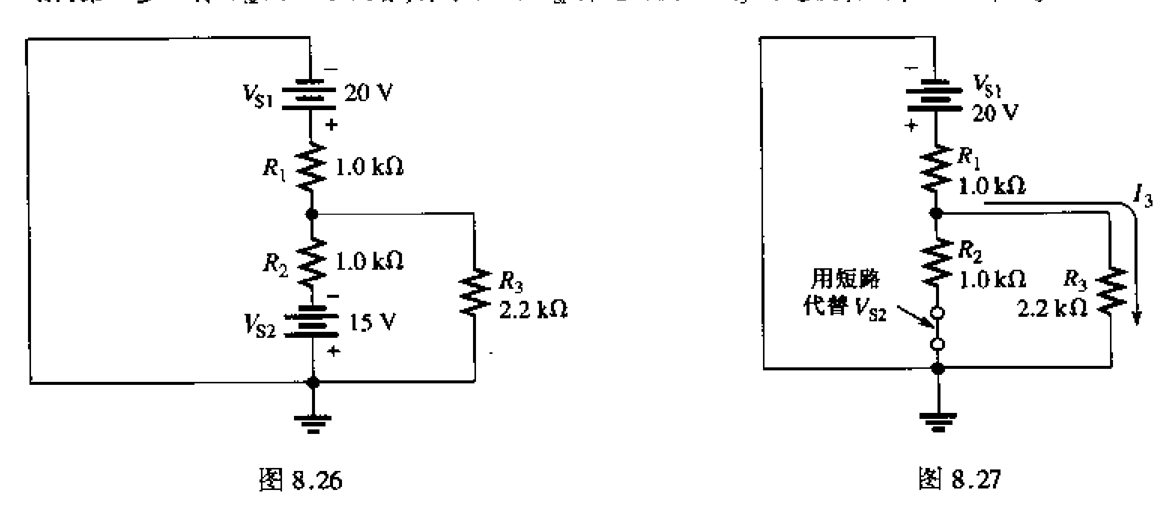


图 8.26　　图 8.27

从 V_{S1} 看，

$$R_{T(S1)} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 1.0\text{ k}\Omega + \frac{(1.0\text{ k}\Omega)(2.2\text{ k}\Omega)}{3.2\text{ k}\Omega} = 1.69\text{ k}\Omega$$

$$I_{T(S1)} = \frac{V_{S1}}{R_{T(S1)}} = \frac{20\text{ V}}{1.69\text{ k}\Omega} = 11.8\text{ mA}$$

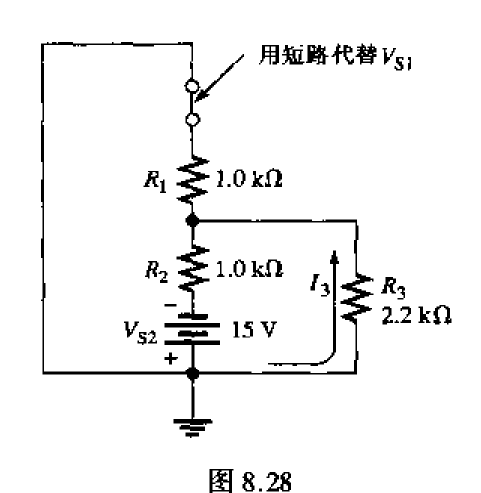


图 8.28

现在应用分流公式求出由电源 V_{S1} 引起的流经 R_3 的电流。

$$I_{3(S1)}=\left(\frac{R_2}{R_2+R_3}\right)I_{T(S2)}=\left(\frac{1.0\ \text{k}\Omega}{3.2\ \text{k}\Omega}\right)11.8\ \text{mA}=3.69\ \text{mA}$$

注意此电流向下流经 R_3。

第二步 将 V_{S1} 用短路代替，并求出由 V_{S2} 引起的流经 R_3 的电流 I_3，如图 8.28 所示。从 V_{S2} 看，

$$R_{T(S2)}=R_2+\frac{R_1R_3}{R_1+R_3}=1.0\ \text{k}\Omega+\frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(2.2\ \text{k}\Omega)}{3.2\ \text{k}\Omega}=1.69\ \text{k}\Omega$$

$$I_{T(S2)}=\frac{V_{S2}}{R_{T(S2)}}=\frac{15\ \text{V}}{1.69\ \text{k}\Omega}=8.88\ \text{mA}$$

现在应用分流公式求出由电源 V_{S2} 引起的流经 R_3 的电流。

$$I_{3(S2)}=\left(\frac{R_1}{R_1+R_3}\right)I_{T(S2)}=\left(\frac{1.0\ \text{k}\Omega}{3.2\ \text{k}\Omega}\right)8.88\ \text{mA}=2.78\ \text{mA}$$

注意此电流向下流经 R_3。

第三步 计算流经 R_3 的总电流。

$$I_{3(tot)}=I_{3(S1)}-I_{3(S2)}=3.69\ \text{mA}-2.78\ \text{mA}=0.91\ \text{mA}=\mathbf{910\ \mu A}$$

此电流向下流经 R_3。

练习：如果 V_{S1} 变为 12 V 并且极性反向，求出图 8.26 中流经 R_3 的总电流。

8.4 节练习

1. 描述叠加定理。
2. 为什么叠加定理对多源线性电路分析十分有用?
3. 为什么在应用叠加定理时，要将电压源短路并将电流源开路?
4. 应用叠加定理，求出图 8.29 中流经 R_1 的电流。

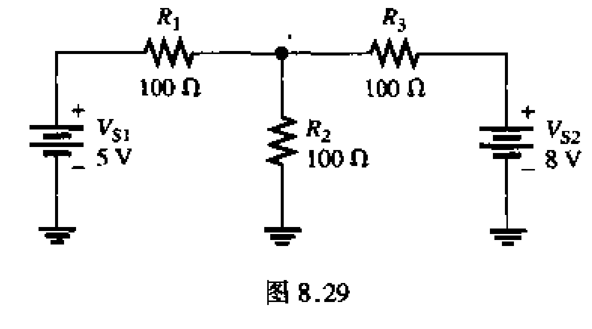


图 8.29

5. 应用叠加定理时，如果两个电流由不同方向流经电路中的一条支路，那么网络中电流的方向如何?

8.5 戴维南定理

戴维南定理提供了一种将电路简化为一种标准等效形式的方法。在许多情况下，此方法可以用于简化复杂电路的分析。

学习完本节后读者应该能够：

- 应用戴维南定理简化电路并进行分析
- 描述戴维南等效电路的形式
- 求戴维南等效电压源
- 求戴维南等效电阻
- 用戴维南定理解释端口等效

■ 将电路的一部分应用戴维南定理化简
■ 将桥式电路应用戴维南定理化简

任何两端口电路的戴维南等效电路形式都包括一个等效电压源(V_{TH})和一个等效电阻(R_{TH}),如图 8.30 所示。等效电压和电阻的值取决于电路初始值。对于所有的阻抗电路,无论多么复杂,都可以使用戴维南定理进行简化。

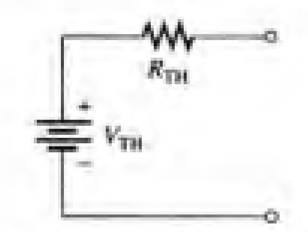


图 8.30 戴维南等效电路的一般形式是一个电压源与一个电阻串联

8.5.1 戴维南等效电压(V_{TH})和等效电阻(R_{TH})

等效电压 V_{TH} 是完整戴维南等效电路的一部分,完整戴维南等效电路的另一部分是 R_{TH}。

戴维南等效电压(V_{TH})等于电路两端间的开路电压(无负载)。

从任何接在 V_{TH} 两端的元件向内看,效果都等同于 V_{TH} 与 R_{TH} 串联。按照戴维南定理定义,

戴维南等效电阻(R_{TH})等于给定电路中所有电源由其内阻代替时两端之间的总电阻。

8.5.2 端口等效

虽然戴维南电路与其原始电路不同,但是就输出电压和电流来说是相同的。如图 8.31 所示,将一个无论多么复杂的电路放入一个黑盒中,只露出其输出端。然后将此电路的戴维南等效电路放入同样的黑盒中,也只露出其输出端。将每个盒子的输出端接上相同的负载电阻。然后接入一个伏特表和一个安培表来测量图中所示的每个负载的电流和电压。测量值将是相同的(忽略误差),并且几乎无法分出哪个黑盒装的是原始电路,哪个装的是戴维南等效电路。也就是说,基于任何电子测量出的观察值,两个电路是相同的。这种情况有时称为端口等效,因为两个电路自两端的"观察点"看来是相同的。

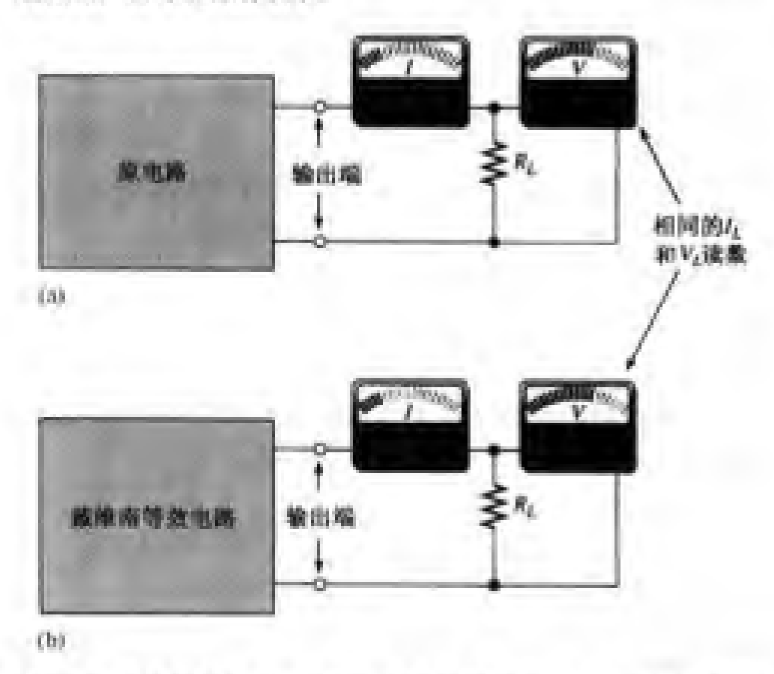


图 8.31 哪个黑盒装的是原始电路,哪个是戴维南等效电路,用观察仪表是分辨不出来的

8.5.3 电路的戴维南等效

为了求得电路的戴维南等效，需要从电路的输出端出发，确定其等效电压 V_{TH} 和等效电阻 R_{TH}。例如，电路 A 和 B 两端的戴维南等效由图 8.32 确定。

图 8.32(a)中，A 和 B 两端间的电压即为戴维南等效电压。在这个特定的电路中，从 A 到 B 的电压与 R_2 两端的电压相同。由于没有电流流经 R_3，所以其上不会有电压降。对这个特定电路，戴维南等效电压可以表示如下：

$$V_{TH}=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_S$$

图 8.32(b)中，电源由短路(零内阻)代替后 A 和 B 间的电阻即为戴维南等效电阻。对这个特定电路，A 和 B 间的电阻为 R_1 和 R_2 并联后再和 R_3 串联。因此，R_{TH} 表示如下：

$$R_{TH}=R_3+\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$$

戴维南等效电路如图 8.32(c)所示。

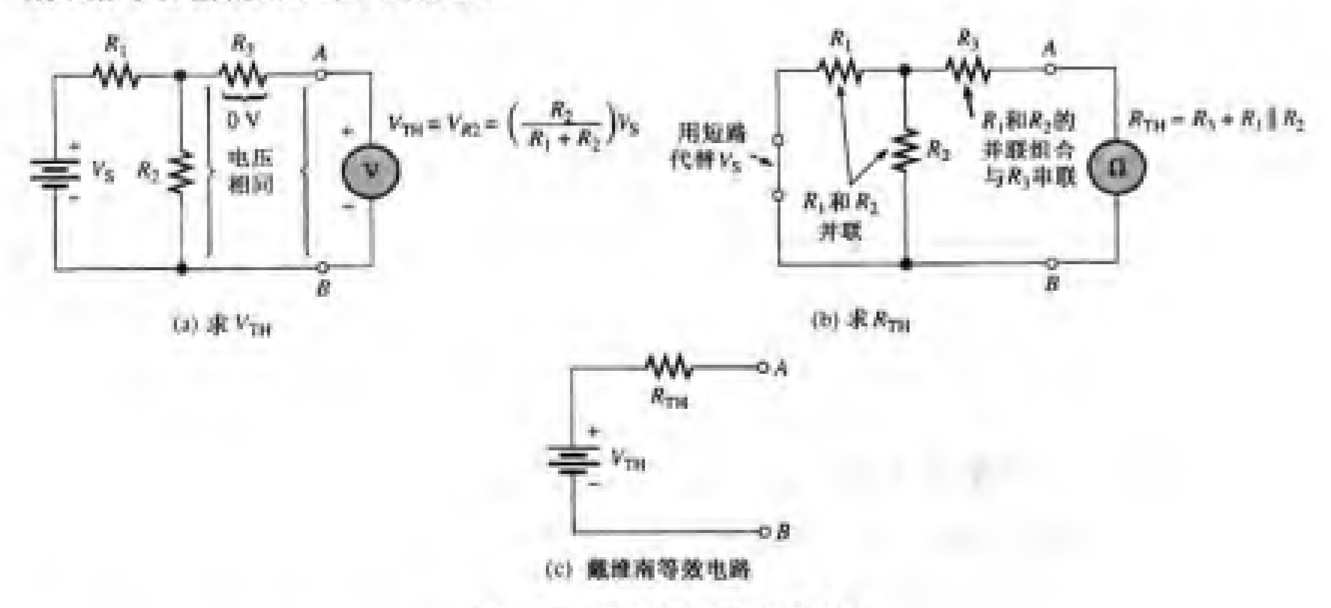


图 8.32 用戴维南定理简化电路

例 8.10 求出图 8.33 中电路 A 和 B 两端间的戴维南等效。

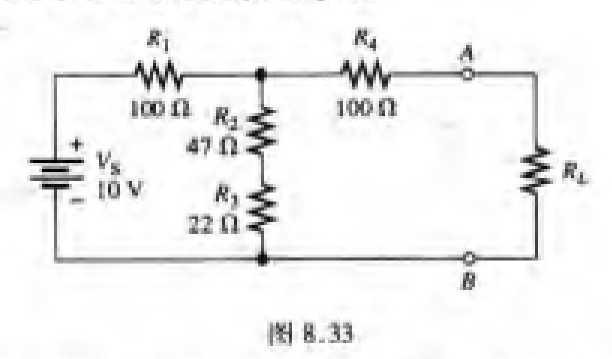


图 8.33

解：首先，移除 R_L。那么 V_{TH} 的值等于 R_2+R_3 两端的电压值，如图 8.34(a)所示。用分压公式求出 V_{TH}。

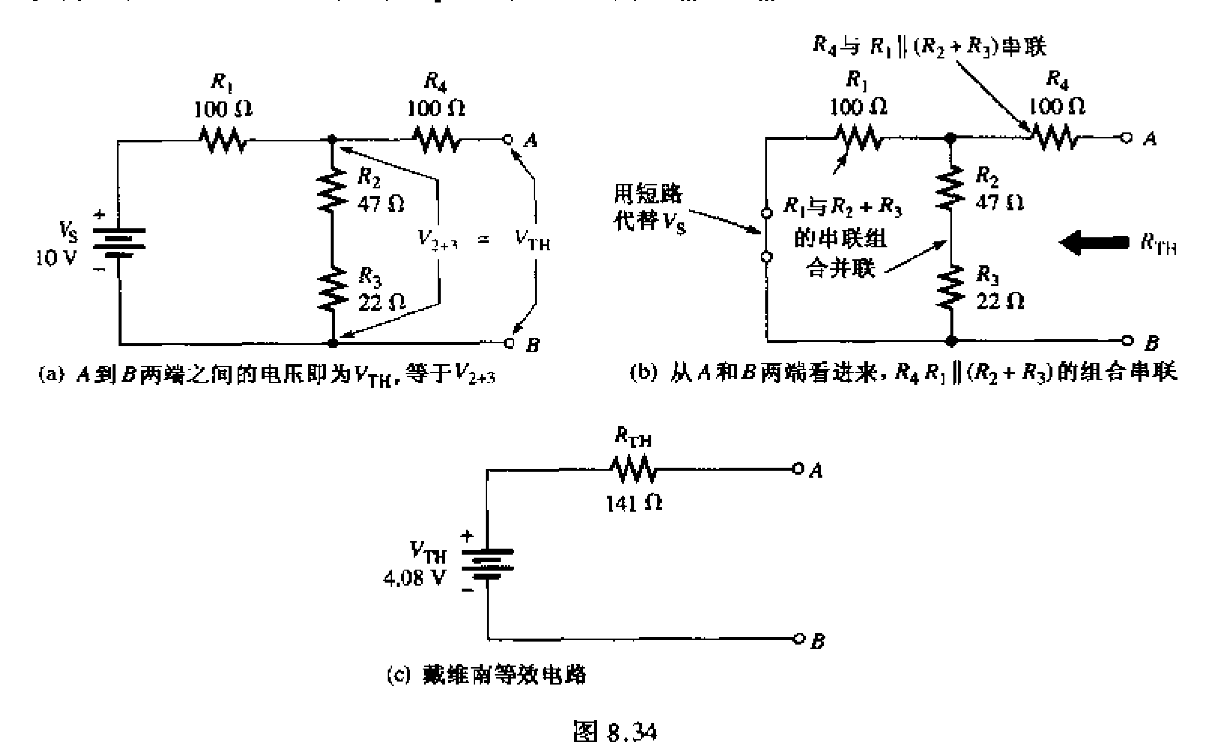
$$V_{TH}=\left(\frac{R_2+R_3}{R_1+R_2+R_3}\right)V_S=\left(\frac{69\ \Omega}{169\ \Omega}\right)10\ V=\mathbf{4.08\ V}$$

为求出 R_{TH}，首先将电源用短路代替以模拟零内阻。然后可得 R_1 与 R_2+R_3 并联，而 R_4 与 R_1，R_2 和 R_3 串并联电路串联，如图 8.34(b)所示。

$$R_{TH}=R_4+\frac{R_1(R_2+R_3)}{R_1+R_2+R_3}=100\ \Omega+\frac{(100\ \Omega)(69\ \Omega)}{169\ \Omega}=\mathbf{141\ \Omega}$$

结果所得戴维南等效电路如图 8.34(c)所示。

练习：如果一个 56 Ω 电阻并联在 R_2 和 R_3 的两端，求 V_{TH}和 R_{TH}。



(a) A到B两端之间的电压即为V_{TH}，等于V_{2+3}

(b) 从A和B两端看进来，R_4 R_1‖(R_2+R_3)的组合串联

(c) 戴维南等效电路

图 8.34

8.5.4 戴维南等效取决于观察点

任何电路的戴维南等效都取决于从哪两个输出端间的位置"看"进去。在图 8.33 中，从标记为 A 和 B 的两端间看电路结构。任何给定电路都有多个戴维南等效，具体取决于怎样选定输出端。例如，在图 8.35 中从 A 和 C 两端观察电路，会得到与从 A 和 B 两端或从 B 和 C 两端观察所得到的完全不同的结果。

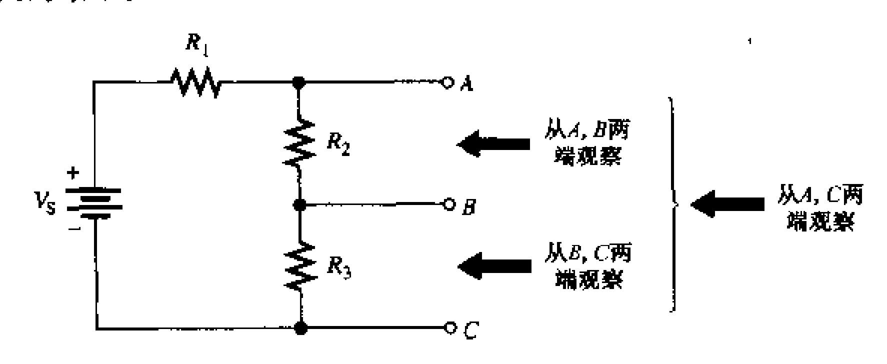


图 8.35 戴维南等效取决于从哪些输出端观察

在图 8.36(a)中，从 A 和 C 两端观察，V_{TH}是 R_2+R_3 上的电压，并且可以用分压公式表示为：

$$V_{TH(AC)}=\left(\frac{R_2+R_3}{R_1+R_2+R_3}\right)V_S$$

同样，如图 8.36(b)所示，A 和 C 两端的电阻为 R_2+R_3 与 R_1 并联(电源由短路代替)，并可以表示为：

$$R_{TH(AC)}=\frac{R_1(R_2+R_3)}{R_1+R_2+R_3}$$

结果所得戴维南等效电路如图 8.36(c)所示。

如图 8.36(d)所示，从 B 和 C 两端观察，V_{TH}为 R_3 两端的电压，并且表示为：

$$V_{TH(BC)}=\left(\frac{R_3}{R_1+R_2+R_3}\right)V_S$$

同样，如图 8.36(e)所示，B 和 C 两端的电阻为R_1+R_2 与 R_3 并联。

$$R_{TH(BC)}=\frac{R_3(R_1+R_2)}{R_1+R_2+R_3}$$

结果所得戴维南等效电路如图 8.36(f)所示。

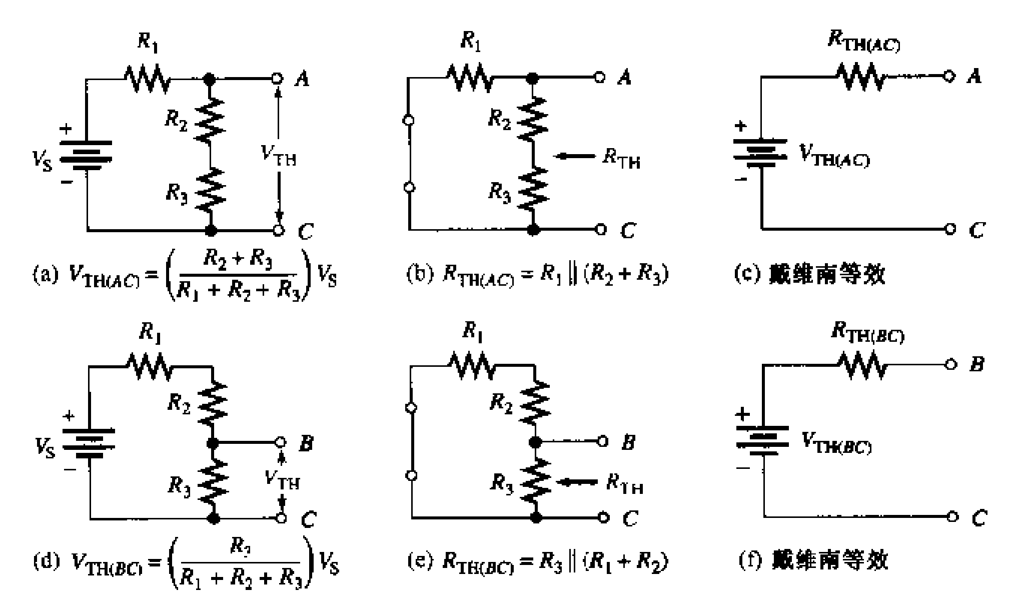


图 8.36　从不同端口将电路戴维南化的例子。(a)，(b)和(c)表明一组端口，(d)，(e)和(f)表明另一组端口(V_{TH}和R_{TH}对每一种情况是不同的)

8.5.5　将电路一部分戴维南化

在许多情况下，只将电路的一部分戴维南化(用戴维南定理化简)是很有帮助的。例如，如果需要知道从电路中某一个特别的电阻来观察所得的等效电路，可以移除此电阻，并对电路中的其他部分应用戴维南定理，就像从在此电阻接入的两端观察一样。图 8.37 显示了此电路一部分的戴维南定理化简。

用这类方法，可以很容易地只用欧姆定律求出多值的特定电阻的电压和电流。这种方法略去了对不同电阻值重新分析原始电路的必要性。

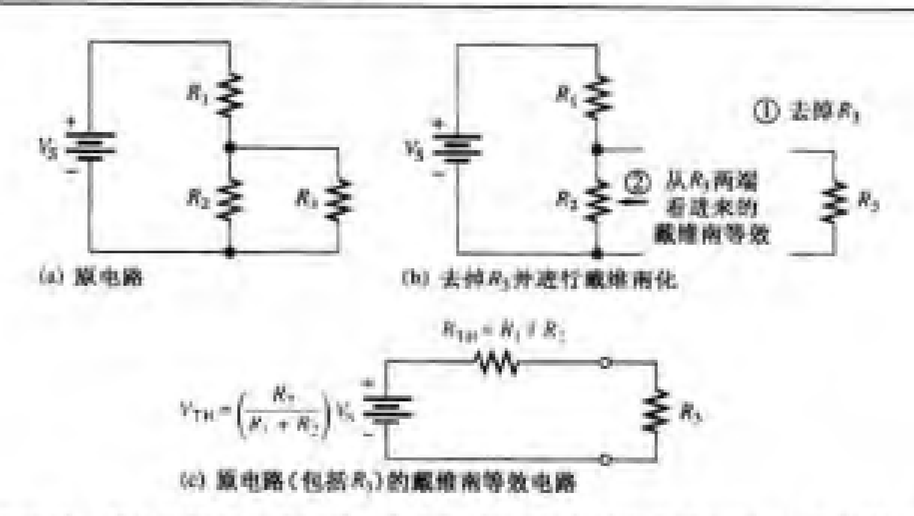


图 8.37 将电路一部分戴维南化的例子。在这种情况下,电路在负载电阻 R_3 的观察点被戴维南化

8.5.6 将桥式电路戴维南化简

戴维南定理的有用之处可能在应用于惠斯通电桥电路时才能最充分地体现出来。例如,一个负载电阻接到惠斯通电桥的输出端,如图 8.38 所示。因为此电路不是简单的串并联排列,所以非常难以分析。没有哪个电阻和其他电阻是串联或并联的。

用戴维南定理,可以从负载电阻观察将桥式电路简化为等效电路,步骤如图 8.39 所示。认真学习图中的步骤。一旦求出电桥的等效电路,对任何值的电阻,可以很容易地确定其电压和电流。

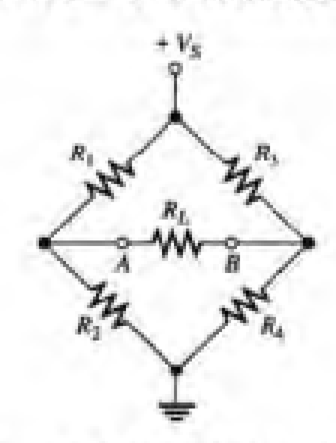


图 8.38 有负载电阻接在输出端的惠斯通电桥并不是简单的串并联电路

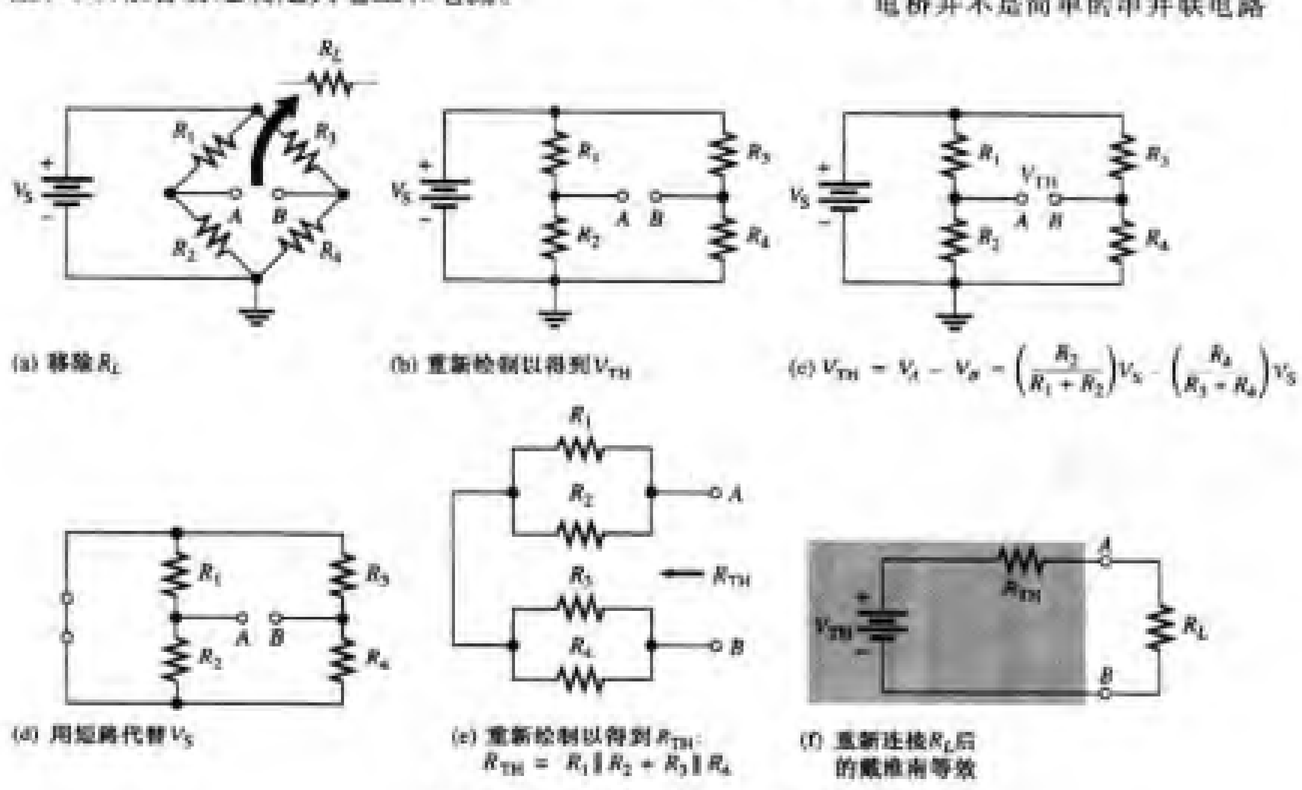


图 8.39 用戴维南定理简化惠斯通电桥

例 8.11　在图 8.40 所示的桥式电路中，确定负载电阻 R_L 的电压和电流。

解：第一步　移除 R_L。

第二步　如图 8.39 所示，从 A 和 B 两端观察将桥式电路戴维南化，首先确定 V_{TH}。

$$V_{TH}=V_A-V_B=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_S-\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\right)V_S$$

$$=\left(\frac{680\ \Omega}{1010\ \Omega}\right)24\ \text{V}-\left(\frac{560\ \Omega}{1240\ \Omega}\right)24\ \text{V}=16.16\ \text{V}-10.84\ \text{V}=5.32\ \text{V}$$

第三步　确定 R_{TH}。

$$R_{TH}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}+\frac{R_3R_4}{R_3+R_4}$$

$$=\left(\frac{(330\ \Omega)(680\ \Omega)}{1010\ \Omega}\right)+\left(\frac{(680\ \Omega)(560\ \Omega)}{1240\ \Omega}\right)=222\ \Omega+307\ \Omega=529\ \Omega$$

第四步　将 V_{TH} 和 R_{TH} 串联以得到戴维南等效电路。

第五步　将负载电阻接在等效电路的 A 和 B 两端，并确定负载的电压和电流，如图 8.41 所示。

$$V_L=\left(\frac{R_L}{R_L+R_{TH}}\right)V_{TH}=\left(\frac{1.0\ \text{k}\Omega}{1.529\ \text{k}\Omega}\right)5.32\ \text{V}=\mathbf{3.48\ V}$$

$$I_L=\frac{V_L}{R_L}=\frac{3.48\ \text{V}}{1.0\ \text{k}\Omega}=\mathbf{3.48\ mA}$$

练习：在图 8.41 中，设 $R_1=2.2\ \text{k}\Omega$，$R_2=3.3\ \text{k}\Omega$，$R_3=3.9\ \text{k}\Omega$ 和 $R_4=2.7\ \text{k}\Omega$，计算 I_L。

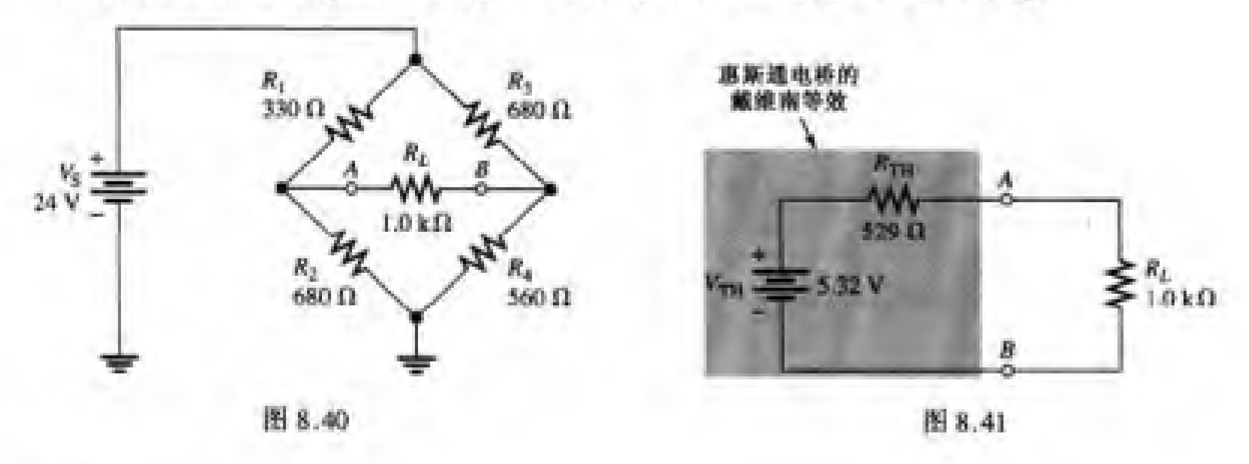


图 8.40　　图 8.41

8.5.7　戴维南定理小结

我们要记住，无论所替代的原始电路是何种形式，戴维南等效电路总是一个电压源与一个电阻串联的形式。戴维南定理的重要性在于就外部负载来说，等效电路可以替代原始电路。任何接在戴维南等效电路两端的负载电阻，其端电压和流过负载的电流均和原始电路相同。

这里将应用戴维南定理的步骤总结如下：

第一步　将想求得其戴维南等效电路的部分两端开路(移除所有电阻)。

第一步　确定开路的两端间电压(V_{TH})。

第三步　将所有电源以其内阻进行替换(理想电压源短路，理想电流源开路)，确定开路的两端间的电阻(R_{TH})。

第四步　将 V_{TH} 和 R_{TH} 串联得出原始电路的完整戴维南等效电路。

第五步 将第一步中移除的负载重新接在戴维南等效电路的两端。现在可只用欧姆定律计算出负载电流和负载电压，并且具有同原始电路中的负载电流和负载电压相同的值。

8.5.8 由测量确定 V_{TH}和 R_{TH}

戴维南定理作为分析工具广泛应用于简化电路分析。然而在许多情况下，实际戴维南等效可由下面的一般测量方法求出。这些步骤如图 8.42 所示。

第一步 从电路的输出端移除所有负载。

第二步 测量开路的两端间电压。伏特表的内阻必须远大于(至少十倍于)电路的 R_{TH}，以使其负载作用可忽略。(V_{TH}是开路的两端间电压。)

第三步 在输出端接入可变电阻(变阻器)。使其阻值达到最大值，此值必须比 R_{TH}大。

第四步 调整变阻器直到端电压等于 $0.5V_{TH}$。在此点，变阻器的电阻等于 R_{TH}。

第五步 从输出端断开变阻器，并用欧姆表测量其电阻值。测量得到的电阻等于 R_{TH}。

确定 R_{TH}的过程不同于理论过程，这是因为在实际电路中短路电压源或开路电流源是不切实际的。同样，在测量 R_{TH}时，要保证电路能够为可变电阻提供所要求的电流并且可变电阻能保持所要求的功率。这些考虑在某些情况下可能使这个过程变得不切实际。

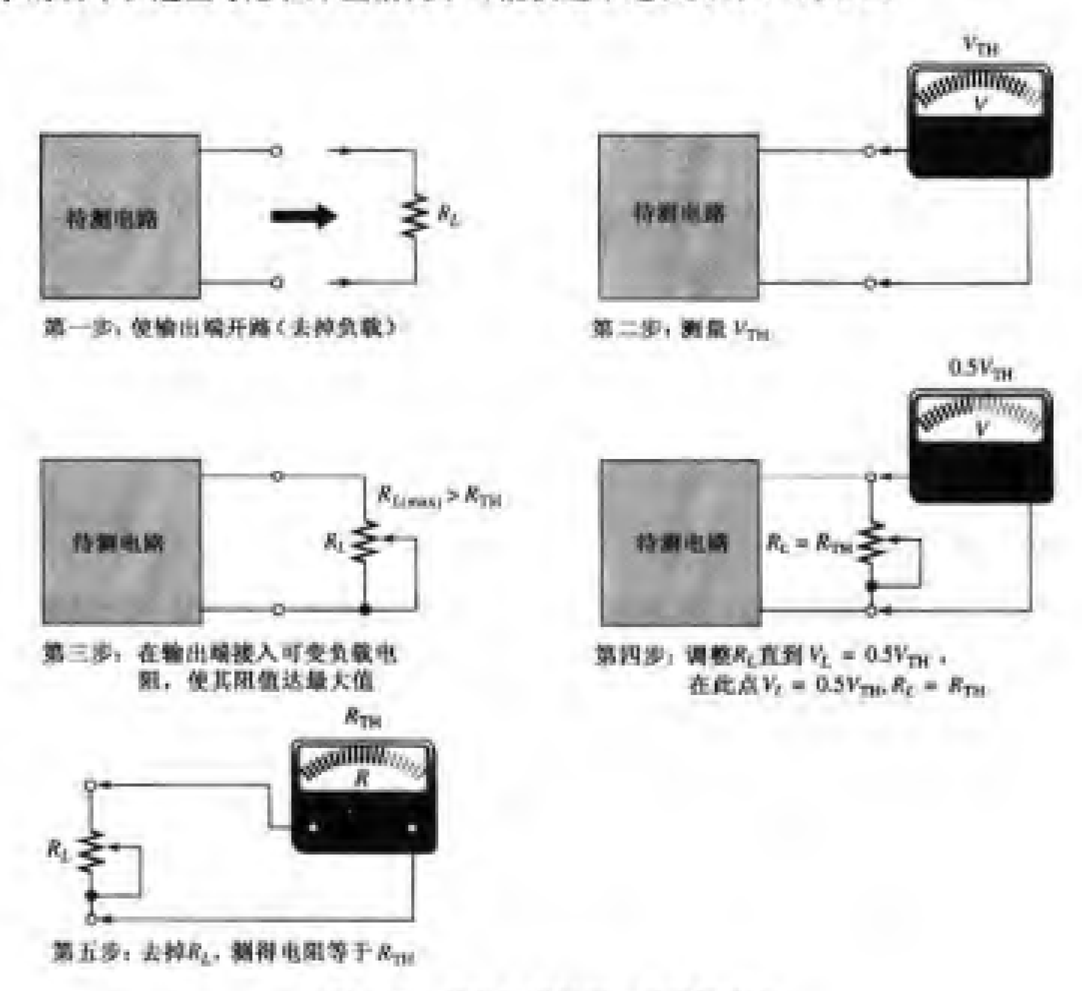


图 8.42 戴维南等效的一般测量方法

8.5节练习

1. 戴维南等效电路的两部分是什么？
2. 画出戴维南等效电路的一般形式。
3. V_{TH}是如何定义的？
4. R_{TH}是如何定义的？
5. 对图8.43中的原始电路，画出从 R_L 观察的其戴维南等效电路。

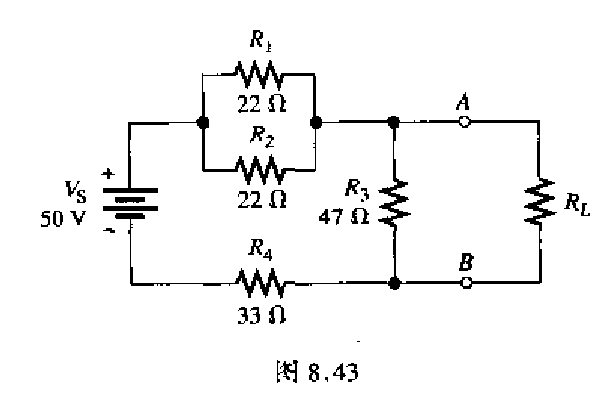


图8.43

8.6　诺顿定理

与戴维南定理类似，诺顿定理提供了一种将较复杂的电路简化为较简单的等效形式的方法。二者根本的不同在于诺顿定理的结果是一个等效电流源与一个等效电阻并联。

学习完本节后读者应该能够：

- 应用诺顿定理简化电路
- 描述诺顿等效电路的形式
- 求得诺顿等效电流源
- 求得诺顿等效电阻

诺顿等效电路的形式如图8.44所示。无论原始两端口电路如何复杂，总可以简化为这种等效形式。等效电流源标记为 I_N，等效电阻标记为 R_N。

为应用诺顿定理，必须知道如何求出 I_N 和 R_N 的数值。一旦确定 I_N 和 R_N 的相应值，将其简单并联起来就可以得到诺顿电路。

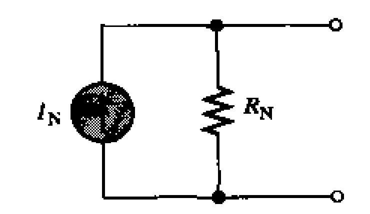


图8.44　诺顿等效电路的形式

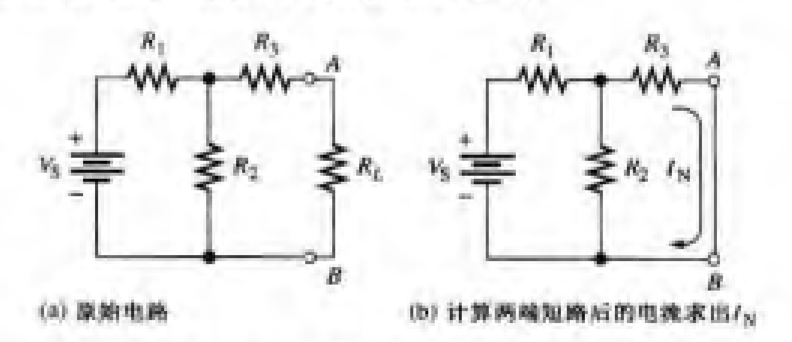
8.6.1　诺顿等效电流(I_N)

如前所述，I_N 为完整诺顿电路的一部分，完整诺顿电路的另一部分为 R_N。

诺顿等效电流(I_N)是电路两个输出端间的短路电流。

任何连接在此两端间的元件实际上"看到"一个值为 I_N 的电流源与 R_N 并联。

为了说明，假设含有一个电阻(R_L)的某种阻抗网络连接在电路的两个输出端之间，如图 8.45(a)所示。要求求出与 R_L"两端"的电路等效的诺顿电路。为求出 I_N，计算 A 和 B 两端短路后的电流，如图 8.45(b)所示。例 8.12 说明如何求得 I_N。



(a) 原始电路　　(b) 计算两端短路后的电流求出 I_N

图 8.45　确定诺顿等效电流 I_N

例 8.12　确定图 8.46(a)所示灰色区域电路中的 I_N。

解：如图 8.46(b)所示，短路 A 和 B 两端。I_N 为短路电流，计算如下。首先，从电压源观察，看到的总电阻为：

$$R_T = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 47\ \Omega + \frac{(47\ \Omega)(100\ \Omega)}{147\ \Omega} = 79\ \Omega$$

电源的总电流为：

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{83.3\ \text{V}}{79\ \Omega} = 1.05\ \text{A}$$

现在应用分流公式求得 I_N(短路电流)。

$$I_N = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3}\right) I_T = \left(\frac{47\ \Omega}{147\ \Omega}\right) 1.05\ \text{A} = \mathbf{336\ mA}$$

所得结果就是等效诺顿电流源的值。

练习：确定图 8.46(a)中的所有电阻阻值增大一倍时的 I_N。

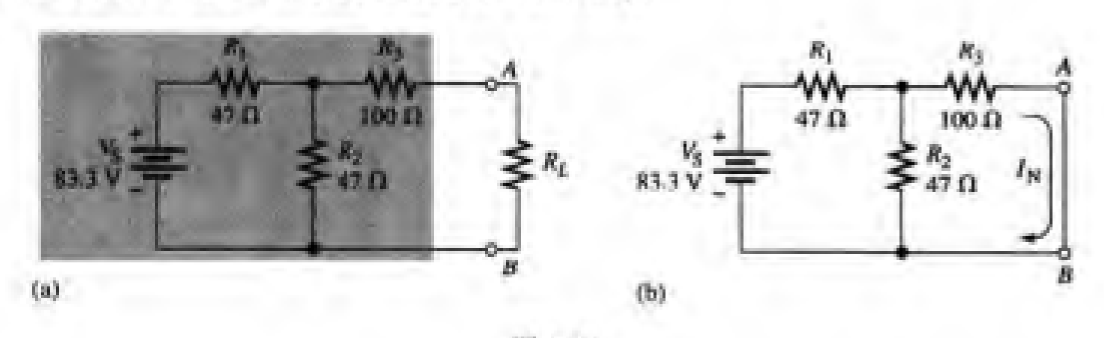


图 8.46

8.6.2 诺顿等效电阻(R_N)

诺顿等效电阻(R_N)的定义同 R_{TH}。

诺顿等效电阻 R_N 等于给定电路中所有电源由其内阻代替时两端之间的总电阻。

例 8.13 说明如何求得 R_N。

例 8.13　确定在图 8.46(a)所示灰色区域电路中的 R_N(参照例 8.12)。

解:首先,通过短路将 V_S 减小到零,如图 8.47 所示。从 A 和 B 两端观察,可以看到 R_1 和 R_2 并联后与 R_3 串联。于是,

$$R_N = R_3 + \frac{R_1}{2} = 100\ \Omega + \frac{47\ \Omega}{2} = \mathbf{124\ \Omega}$$

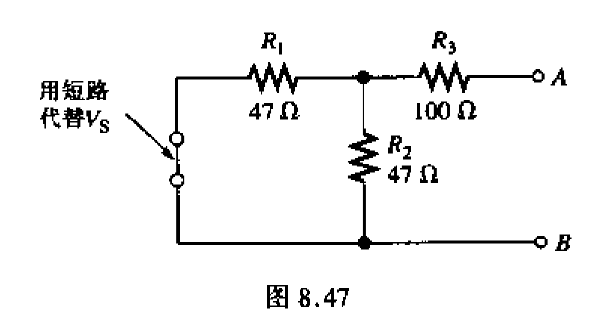


图 8.47

练习:确定图 8.46(a)中的所有电阻阻值增加一倍时的 R_N。

例 8.12 和例 8.13 说明如何求得诺顿等效电路的两个等效元件 I_N 和 R_N。记住对任何线性电路这些值都能求得。一旦知道了这些,必须把它们并联起来才能构成诺顿等效电路,如同例 8.14 中所示。

例 8.14　画出图 8.46(a)(参见例 8.12)中原始电路完整的诺顿等效电路。

解:在例 8.12 和例 8.13 中,已求出 $I_N = 336$ mA 和 $R_N = 124\ \Omega$。其诺顿等效电路如图 8.48 所示。

练习:求出图 8.46(a)中所有电阻阻值增加一倍时的 R_N。

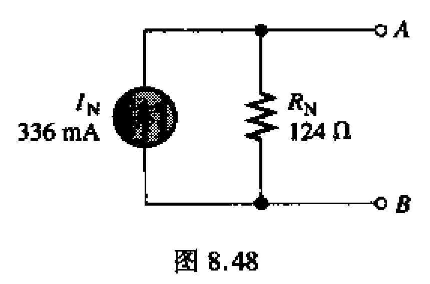


图 8.48

8.6.3　诺顿定理小结

任何接在诺顿等效电路两端的负载电阻,都会有与接在原始电路两端相同的端电压和流过它的电流。

总结出的应用诺顿定理的步骤如下:

第一步　将所要求得其诺顿等效电路的部分两端短路。

第二步　确定短路的两端间电流(I_N)。

第三步　将所有电源以其内阻代替(理想电压源短路,理想电流源开路),确定开路的两端间的电阻(R_N)。$R_N = R_{TH}$。

第四步　将 I_N 和 R_N 并联得出原始电路的完整诺顿等效电路。

诺顿等效电路也可由戴维南等效电路通过 8.3 节中讨论的源变换方法得到。

8.6 节练习

1. 诺顿等效电路的两部分是什么?
2. 画出诺顿等效电路的一般形式。
3. I_N 是如何定义的?
4. R_N 是如何定义的?
5. 画出图 8.49 中从 R_L 观察到的诺顿等效电路。

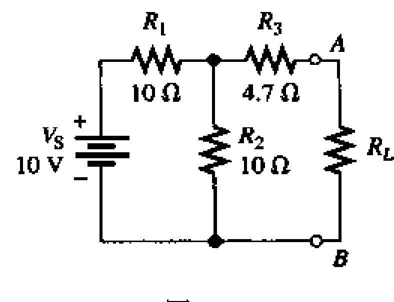


图 8.49

8.7　最大功率传递定理

在需要知道负载的值为多大的情况下电源所传递的功率最大时,最大功率传递定理是十分重要的。

学习完本节后读者应该能够：

- 应用最大功率传递定理
- 描述此定理
- 确定在给定电路时，负载电阻为多大时传递的功率最大

最大功率传递定理的描述如下：

当负载电阻与源内阻相等时，电源向负载传递的功率最大。

电路的源内阻 R_S 为用戴维南定理从输出端观察所得的等效电阻。一个戴维南等效电路和它的输出电阻以及负载如图 8.50 所示。当 $R_L = R_S$ 时，电压源向 R_L 传递提供的最大功率。

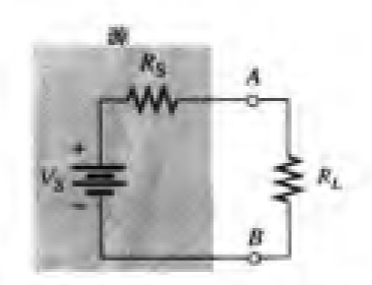


图 8.50 当 $R_L = R_S$ 时，向负载传递最大功率

最大功率传递定理的实际应用包括音频系统，如立体声、收音机和扩音器。在这些系统中扬声器的电阻就是负载。驱动扬声器的电路是一个功率放大器。一般认为这些扬声器达到最大功率为最佳。为此，扬声器的电阻必须与放大器的源内阻相等。

例 8.15 说明当 $R_L = R_S$ 时出现最大功率。

例 8.15 图 8.51 中电源的源内阻为 75 Ω。确定负载电阻为以下值时的负载功率：

(a) 25 Ω (b) 50 Ω (c) 75 Ω (d) 100 Ω (e) 125 Ω

画出负载功率与负载电阻的关系图。

解：用欧姆定律（$I = V/R$）和功率公式（$P = I^2R$）求出每一个负载电阻值的负载功率 P_L。

(a) 当 $R_L = 25\ \Omega$ 时，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\ \text{V}}{75\ \Omega + 25\ \Omega} = 100\ \text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (100\ \text{mA})^2(25\ \Omega) = \mathbf{250\ mW}$$

(b) 当 $R_L = 50\ \Omega$ 时，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\ \text{V}}{125\ \Omega} = 80\ \text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (80\ \text{mA})^2(50\ \Omega) = \mathbf{320\ mW}$$

(c) 当 $R_L = 75\ \Omega$ 时，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\ \text{V}}{150\ \Omega} = 66.7\ \text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (66.7\ \text{mA})^2(75\ \Omega) = \mathbf{334\ mW}$$

(d) 当 $R_L = 100\ \Omega$ 时，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\ \text{V}}{175\ \Omega} = 57.1\ \text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (57.1\ \text{mA})^2(100\ \Omega) = \mathbf{326\ mW}$$

(e) 当 $R_L = 125\ \Omega$ 时，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\ \text{V}}{200\ \Omega} = 50\ \text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (50\ \text{mA})^2(125\ \Omega) = \mathbf{313\ mW}$$

注意，当 $R_L = 75\ \Omega$ 时负载功率最大，此时它等于源内阻。当负载电阻大于或小于 75 Ω 时，功率下降，如图 8.52 中的曲线图所示。

练习：如果图 8.51 中的源内阻为 600 Ω，可以向负载传递的最大功率为多少？

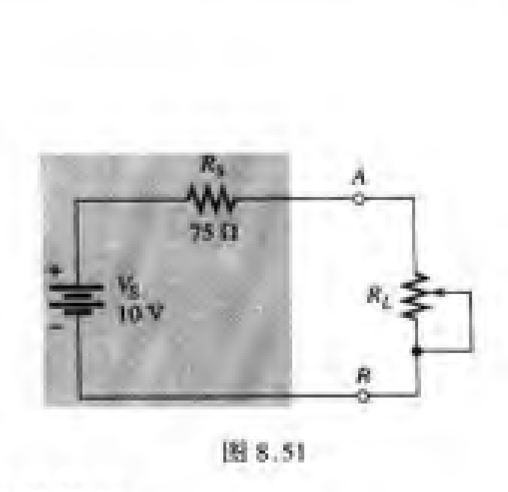


图 8.51

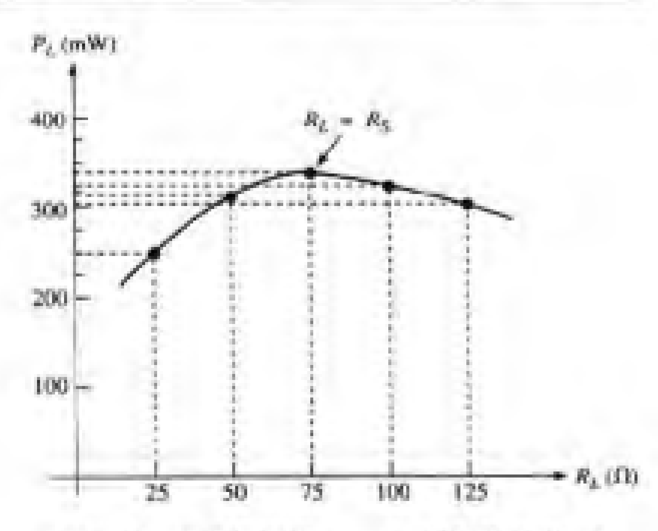


图 8.52　曲线说明当 $R_L = R_S$ 时负载功率最大

8.7 节练习

1. 描述最大功率传递定理。
2. 电源何时向负载提供最大功率？
3. 一个给定电路的源内阻为 50 Ω。传递最大功率时负载的值应是多少？

8.8　三角形－星形(Δ-Y)变换和星形－三角形(Y-Δ)变换

三角形和星形(Δ-Y)网络连接式间的变换在某些特定的三端情形中是十分有用的。带负载惠斯通电桥的分析便是一个例子。在本节中给出了需要记住的变换公式和规则。

学习完本节后读者应该能够：

- 进行 Δ-Y 变换和 Y-Δ 变换
- 对桥式电路应用 Δ-Y 变换

阻抗型三角形(Δ)网络为图 8.53(a)中所示的三端排列。星形(Y)网络如图 8.53(b)所示。注意下标字母用于标记三角形网络中的电阻，下标数字用于标记星形网络中的电阻。

8.8.1　Δ-Y 变换

设想将星形放在三角形里面是很方便的，如图 8.54 所示。为将三角形变换为星形，需要用 R_A，R_B 和 R_C 表示 R_1，R_2 和 R_3。变换规则如下：

星形网络中的每个电阻等于三角形网络中两个相邻支路电阻的乘积，除以三个三角形网络电阻的和。

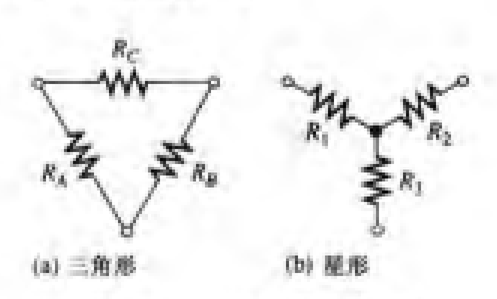


图 8.53　三角形和星形网络

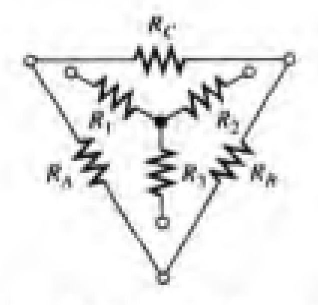


图 8.54　"Y"放在"Δ"中得出变换公式

图 8.54 中,R_A 和 R_C 与 R_1 相邻,所以:

$$R_1 = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C} \tag{8.1}$$

同样,R_B 和 R_C 与 R_2 相邻,所以:

$$R_2 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C} \tag{8.2}$$

同样,R_A 和 R_B 与 R_3 相邻,所以:

$$R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C} \tag{8.3}$$

8.8.2 Y-Δ 变换

为将星形变换为三角形,需要用 R_1,R_2 和 R_3 表示 R_A,R_B 和 R_C。变换规则如下:

三角形网络中的每个电阻等于星形网络中所有可能的两个电阻乘积的和,除以相对的星形网络电阻。

图 8.54 中,R_2 与 R_A 相对,所以:

$$R_A = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_2} \tag{8.4}$$

同样,R_1 与 R_B 相对,所以:

$$R_B = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1} \tag{8.5}$$

同样,R_3 与 R_C 相对,所以:

$$R_C = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_3} \tag{8.6}$$

下面的两个例子说明这两种形式的网络间的变换。

例 8.16 将图 8.55 中的三角形网络变换为星形网络。

解:用式(8.1)、式(8.2)和式(8.3)。

$$R_1 = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(220\ \Omega)(100\ \Omega)}{220\ \Omega + 560\ \Omega + 100\ \Omega} = \mathbf{25\ \Omega}$$

$$R_2 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(560\ \Omega)(100\ \Omega)}{880\ \Omega} = \mathbf{63.6\ \Omega}$$

$$R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(220\ \Omega)(560\ \Omega)}{880\ \Omega} = \mathbf{140\ \Omega}$$

结果所得的星形网络如图 8.56 所示。

练习:当 $R_A = 2.2\ \text{k}\Omega$,$R_B = 1.0\ \text{k}\Omega$ 和 $R_C = 1.8\ \text{k}\Omega$ 时,将三角形网络变换为星形网络。



图 8.55　　图 8.56

例 8.17　将图 8.57 中的星形网络变换为三角形网络。

解: 用式(8.4)、式(8.5)和式(8.6)。

$$R_A = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_2}$$

$$= \frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(2.2\ \text{k}\Omega) + (1.0\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega) + (2.2\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega)}{2.2\ \text{k}\Omega} = \mathbf{9.15\ k\Omega}$$

$$R_B = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_1}$$

$$= \frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(2.2\ \text{k}\Omega) + (1.0\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega) + (2.2\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega)}{1.0\ \text{k}\Omega} = \mathbf{20.1\ k\Omega}$$

$$R_C = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_3}$$

$$= \frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(2.2\ \text{k}\Omega) + (1.0\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega) + (2.2\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega)}{5.6\ \text{k}\Omega} = \mathbf{3.59\ k\Omega}$$

结果所得的三角形网络如图 8.58 所示。

图 8.57

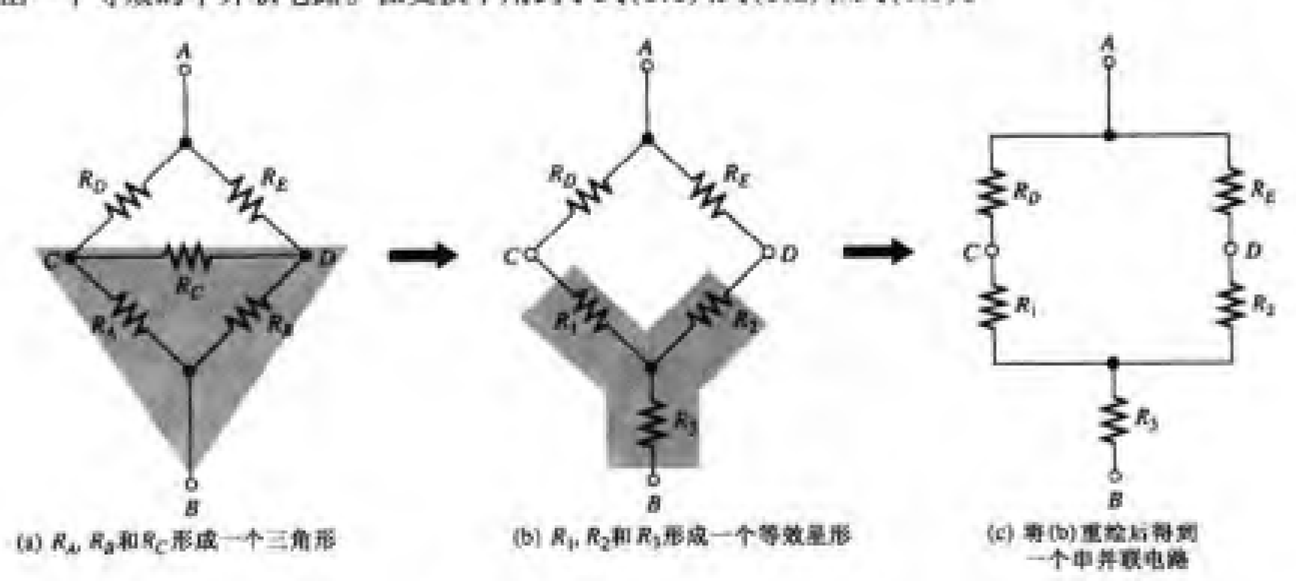
图 8.58

练习：若 $R_1 = 100\ \Omega$，$R_2 = 330\ \Omega$ 和 $R_3 = 470\ \Omega$，将星形网络变换为三角形网络。

8.8.3　应用 Δ-Y 变换简化桥式电路

在 8.5 节中介绍了如何用戴维南定理简化桥式电路。现在，我们将论述 Δ-Y 变换如何应用于将桥式电路变换为串并联电路以简化分析。

图 8.59 说明由 R_A，R_B 和 R_C 组成的三角形(Δ)网络是如何变换为星形(Y)网络的，由此得出一个等效的串并联电路。在变换中用到了式(8.1)、式(8.2)和式(8.3)。



(a) R_A, R_B和R_C形成一个三角形　(b) R_1, R_2和R_3形成一个等效星形　(c) 将(b)重绘后得到一个串并联电路

图 8.59　将桥式电路变换为串并联电路

在桥式电路中，负载接在 C 和 D 两端。在图 8.59(a)中，R_C 表示负载电阻。电压加在 A 和 B 两端时，从 C 到 D 的电压(V_{CD})可以用图 8.59(c)中的等效串并联电路确定如下。从 A 到 B 端的总电阻为：

$$R_T = \frac{(R_1 + R_D)(R_2 + R_E)}{(R_1 + R_D) + (R_2 + R_E)} + R_3$$

于是，

$$I_T = \frac{V_{AB}}{R_T}$$

图 8.59(c)中电路并联部分的电阻为：

$$R_{T(p)} = \frac{(R_1 + R_D)(R_2 + R_E)}{(R_1 + R_D) + (R_2 + R_E)}$$

左支路流过的电流为：

$$I_{AC} = \left(\frac{R_{T(p)}}{R_1 + R_D}\right) I_T$$

右支路流过的电流为：

$$I_{AD} = \left(\frac{R_{T(p)}}{R_2 + R_E}\right) I_T$$

C 端对 A 端的电压为：

$$V_{CA} = V_A - I_{AC}R_D$$

D 端对 A 端的电压为：

$$V_{DA} = V_A - I_{AD}R_E$$

C 端对 D 端的电压为：

$$\begin{aligned} V_{CD} &= V_{CA} - V_{DA} \\ &= (V_A - I_{AC}R_D) - (V_A - I_{AD}R_E) = I_{AD}R_E - I_{AC}R_D \end{aligned}$$

V_{CD} 为图 8.59(a)中桥式电路负载(R_C)两端的电压。

流过 R_C 的负载电流可由欧姆定律求得。

$$I_{R_C} = \frac{V_{CD}}{R_C}$$

例 8.18 确定图 8.60 中桥式电路的负载电阻两端的电压和流过的电流。注意，电阻标记为便于运用式(8.1)、式(8.2)和式(8.3)进行变换的形式。R_C 为负载电阻。

解： 首先，将由 R_A，R_B 和 R_C 组成的三角形网络变换为星形网络。

$$R_1 = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(2.2\ \text{k}\Omega)(18\ \text{k}\Omega)}{2.2\ \text{k}\Omega + 2.7\ \text{k}\Omega + 18\ \text{k}\Omega} = 1.73\ \text{k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(2.7\ \text{k}\Omega)(18\ \text{k}\Omega)}{22.9\ \text{k}\Omega} = 2.12\ \text{k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(2.2\ \text{k}\Omega)(2.7\ \text{k}\Omega)}{22.9\ \text{k}\Omega} = 259\ \text{k}\Omega$$

结果所得等效串并联电路如图 8.61 所示。

接下来，根据图 8.61 确定 R_T 和支路电流。

$$R_T = \frac{(R_1 + R_D)(R_2 + R_E)}{(R_1 + R_D) + (R_2 + R_E)} + R_3$$

$$= \frac{(6.43\ \text{k}\Omega)(6.02\ \text{k}\Omega)}{6.43\ \text{k}\Omega + 6.02\ \text{k}\Omega} + 259\ \Omega = 3.11\ \text{k}\Omega + 259\ \Omega = 3.37\ \text{k}\Omega$$

$$I_T = \frac{V_{AB}}{R_T} = \frac{120\ \text{V}}{3.37\ \text{k}\Omega} = 35.6\ \text{mA}$$

电路并联部分的总电阻 $R_{T(p)}$ 为 3.11 kΩ。

$$I_{AC} = \left(\frac{R_{T(p)}}{R_1 + R_D}\right) I_T = \left(\frac{3.11\ \text{k}\Omega}{1.73\ \text{k}\Omega + 4.7\ \text{k}\Omega}\right) 35.6\ \text{mA} = 17.2\ \text{mA}$$

$$I_{AD} = \left(\frac{R_{T(p)}}{R_2 + R_E}\right) I_T = \left(\frac{3.11\ \text{k}\Omega}{2.12\ \text{k}\Omega + 3.9\ \text{k}\Omega}\right) 35.6\ \text{mA} = 18.4\ \text{mA}$$

C 端到 D 端的电压为：

$$V_{CD} = I_{AD}R_E - I_{AC}R_D = (18.4\ \text{mA})(3.9\ \text{k}\Omega) - (17.2\ \text{mA})(4.7\ \text{k}\Omega) = 71.8\ \text{V} - 80.8\ \text{V} = -9\ \text{V}$$

V_{CD} 为图 8.60 中桥式电路负载(R_C)两端的电压。流过 R_C 的负载电流为：

$$I_{R_C} = \frac{V_{CD}}{R_C} = \frac{-9\ \text{V}}{18\ \text{k}\Omega} = -500\ \mu\text{A}$$

练习：当图 8.60 中的电阻阻值为 $R_A = 27\ \text{k}\Omega$，$R_B = 33\ \text{k}\Omega$，$R_D = 39\ \text{k}\Omega$，$R_E = 47\ \text{k}\Omega$ 和 $R_C = 100\ \text{k}\Omega$ 时，确定负载电流 I_{R_C}。

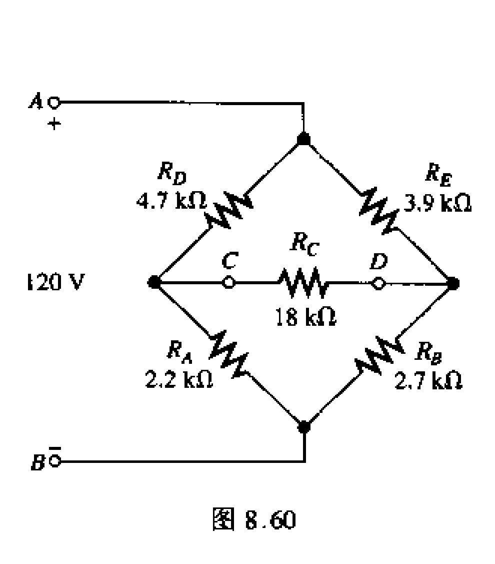


图 8.60

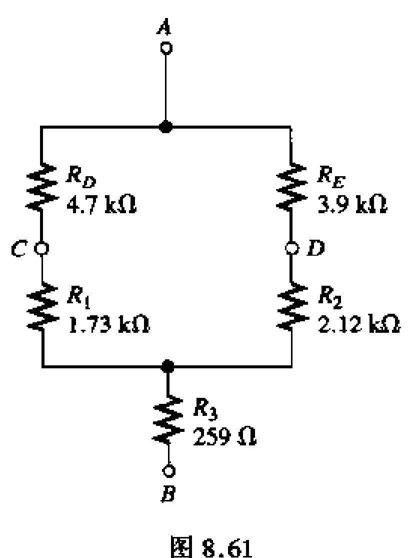


图 8.61

8.8 节练习

1. 画出一个三角形电路。
2. 画出一个星形电路。
3. 写出 Δ-Y 变换公式。
4. 写出 Y-Δ 变换公式。

技术实践

在第 7 章中讨论了惠斯通电桥。在本次技术实践中，将研究由热敏电阻做温度传感器的温度测量电路中的一个桥式电路。用戴维南定理对这个电路做初步分析。

惠斯通电桥应用于温度传感电路,就是用一个桥臂上的热敏电阻监视用于特定工业进程中液体的温度。在这种情况下应用的热敏电阻为一个具有负温度系数的温度传感电阻,即电阻的阻值随温度的升高而降低。

达到某个预设的温度时电桥平衡,其输出为零。检测零电压情况需要将一个高增益的放大电路操作为继电器来关闭加热元件。随着温度降低到低于预设值,电桥又变得不平衡,导致放大器断开继电器而开启加热元件。这个过程维持箱体中液体的温度在限定的范围内。

放大器输出端间的内阻为 10 kΩ。这里不需要了解放大电路的其他任何细节,因为只需要集中关注桥式电路。放大器将在以后介绍。

惠斯通电桥的控制和温度测量电路如图 8.62 所示。放大器和继电器电路系统接在桥的 A 和 B 两端,这两端间会有 10 kΩ 的电阻。热敏电阻连在一个桥臂上,接在箱体中,远离电路的其他部分。可变电阻 R_2 用于设定箱体中的液体所希望保持的温度。热敏电阻的温度特性如图 8.63 中的图形所示,表示出热敏电阻怎样随温度变化。惠斯通电桥焊接在图 8.64(a)所示的 PC 板上。一个探头型热敏电阻通过箱体壁插入液体中,如图 8.84(b)所示;电路由 12 V 电池供电,如图 8.84(c)所示。放大器和继电器电路系统放置在一个没有画出的独立模块中。

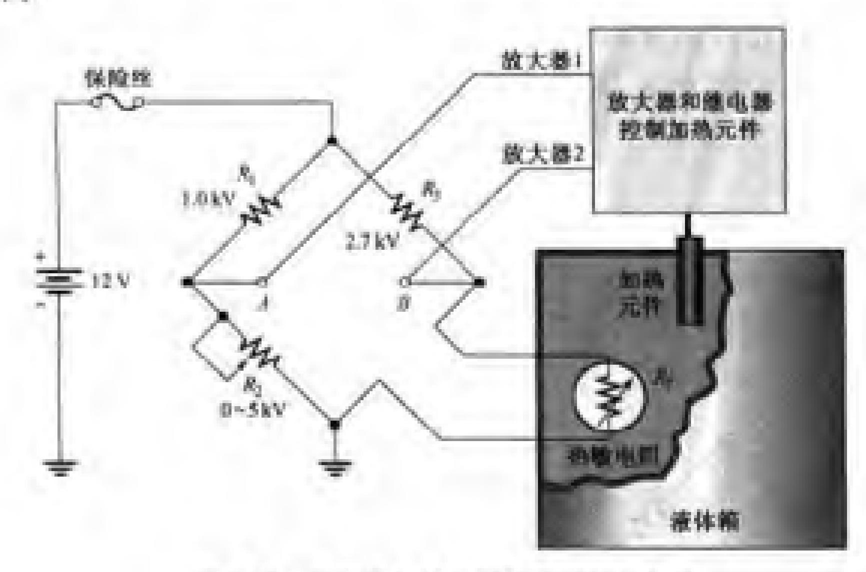


图 8.62 惠斯通电桥控制和温度测量电路

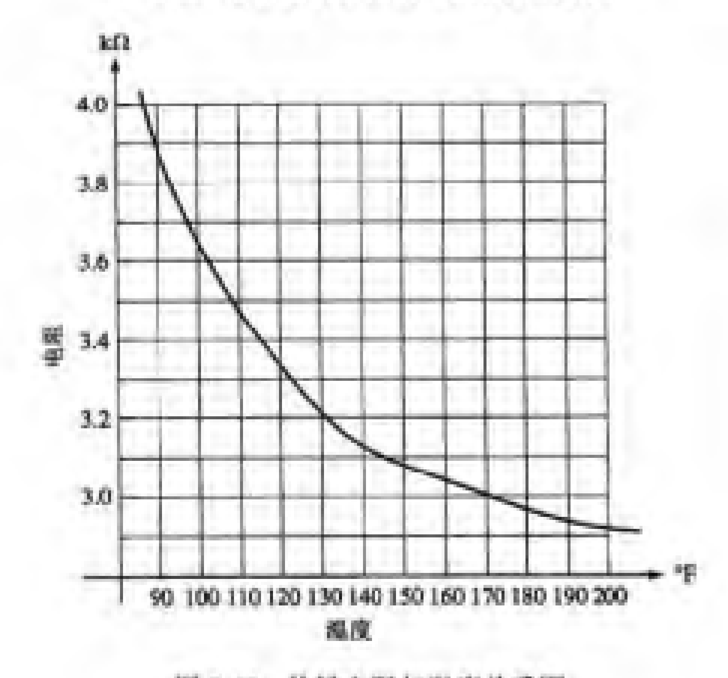
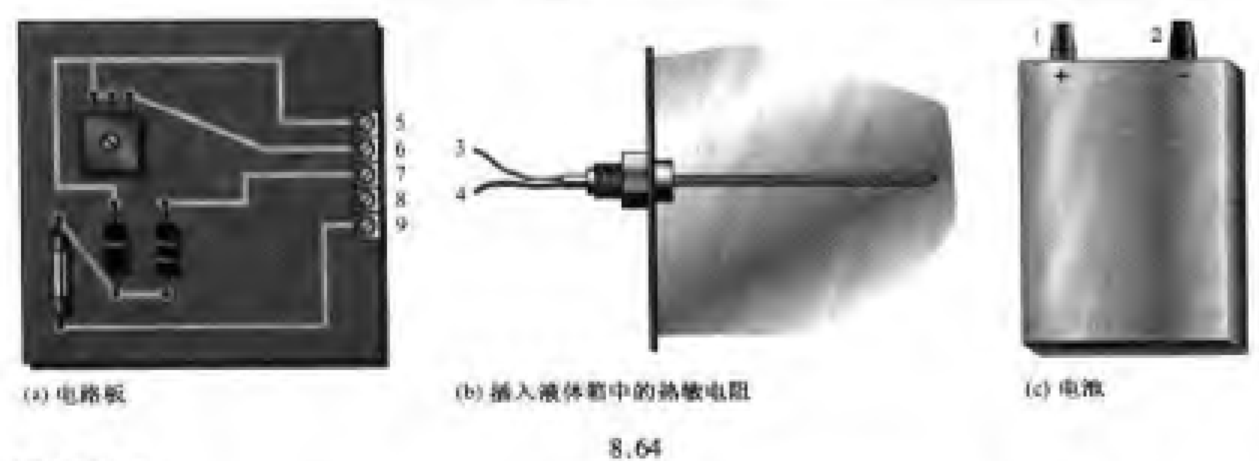


图 8.63 热敏电阻与温度关系图



(a) 电路板　(b) 插入液体箱中的热敏电阻　(c) 电池

8.64

印刷电路板

■ 检查电路板，确定它与图 8.62 中的示图相同。根据该图电路板连接每个输入、输出和元件。

接线表

■ 制定一个点对点接线表以正确连接图 8.62 中的元件。虽然图中没有画出，但还是要包括放大器的输入（称为放大器 1 和放大器 2）。

平衡电桥

■ 由图 8.63 计算出为使电桥在 170 ℉时平衡的 R_2 的电阻值。

分析

■ 假设 R_2 已经校准为在 170 ℉时平衡。用戴维南定理，确定在下面的每一个温度下热敏电阻两端的电压和流过它的电流：90 ℉，100 ℉，110 ℉，120 ℉，130 ℉，140 ℉，150 ℉，160 ℉，170 ℉，180 ℉，190 ℉和 200 ℉。这些数据可用于估计热敏电阻所消耗的功率。

■ 根据图 8.65，确定由电压表显示的每一个电压对应的箱体中的大致温度。R_2 设定为 1.5 kΩ。假设电路板已根据制订的接线表完成全部连接，为简单起见，线路并未画出。同样，假设仪表对桥式电路的影响可忽略。

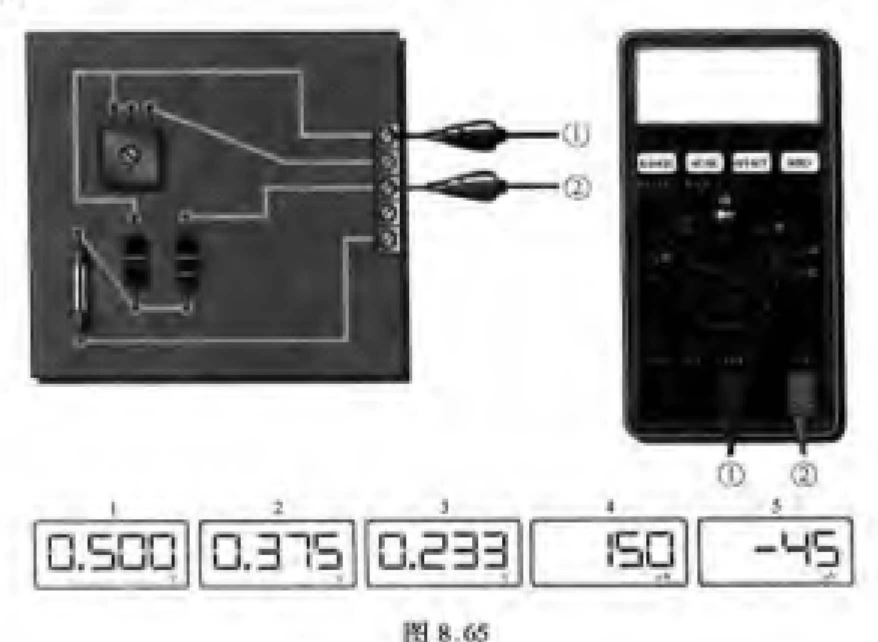


图 8.65

技术实践练习

1. 讨论热敏电阻的用途。
2. 图 8.62 所示的系统中,加热元件何时开启?

小结

- 理想电压源具有零内阻。它的两端提供常量电压,无论负载电阻为多大。
- 实际电压源具有非零内阻。
- 理想电流源具有无穷大内阻。它提供常量电流,无论负载电阻为多大。
- 实际电流源具有有限内阻。
- 叠加定理对多源电路十分有用。
- 戴维南定理提供了将线性电路的任何两端简化为包括一个等效电压源与一个等效电阻串联的一种等效形式的方法。
- 等效这个术语,如同在戴维南定理和诺顿定理中的应用一样,意味着一个给定负载电阻接在等效电路上,就将具有与连在原始电路上一样的两端电压和流过它的电流。
- 诺顿定理提供了将线性电路的任何两端简化为包括一个等效电流源与一个等效电阻并联的一种等效形式的方法。
- 当负载电阻等于源内阻时,电源对负载传递的功率最大。

主要术语

电流源:一个无论负载电阻为多大都能理想地提供常量电流的设备。

最大功率传递:当负载电阻等于源内阻时,电源对负载的最大功率传递。

诺顿定理:一种将两端线性阻抗电路简化为一个电流源与一个电阻并联的等效电路的方法。

叠加定理:一种分析多源电路的方法。

端口等效:任何给定电阻连在两个电源上,这两个电源提供相同负载电压和负载电流的情况为端口等效。

戴维南定理:一种将线性电路的两端简化为一个电压源与一个电阻串联的等效电路的方法。

电压源:一个无论负载电阻为多大都能理想地提供常量电压的设备。

公式

Δ-Y 变换

8.1 $R_1=\dfrac{R_AR_C}{R_A+R_B+R_C}$

8.2 $R_2=\dfrac{R_BR_C}{R_A+R_B+R_C}$

8.3 $R_3=\dfrac{R_AR_B}{R_A+R_B+R_C}$

Y-Δ 变换

8.4 $R_A=\dfrac{R_1R_2+R_1R_2+R_2R_3}{R_2}$

8.5 $R_B=\dfrac{R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3}{R_1}$

8.6 $R_C=\dfrac{R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3}{R_3}$

自测题

1. 一个 100 Ω 负载连接在一个 $V_S = 10$ V 的理想电压源两端。负载两端的电压为：

   (a) 0 V　(b) 10 V　(c) 100 V

2. 一个 100 Ω 负载连接在一个 $V_S = 10$ V, $R_S = 10$ Ω 的电压源两端。负载两端的电压为：

   (a) 10 V　(b) 0 V　(c) 9.09 V　(d) 0.909 V

3. 一个特定电压源具有 $V_S = 25$ V, $R_S = 5$ Ω。等效电流源的值为：

   (a) 5 A,5 Ω　(b) 25 A,5 Ω　(c) 5 A,125 Ω

4. 一个特定电流源具有 $I_S = 3$ μA, $R_S = 1.0$ MΩ。等效电压源的值为：

   (a) 3 μV,1.0 MΩ　(b) 3 V,1.0 MΩ　(c) 1 V,3.0 MΩ

5. 在一个双电源电路中，一个电源为一条支路单独提供 10 mA 电流。另一个电源为同一条支路单独提供 8 mA 的反向电流。支路中的实际电流为：

   (a) 10 mA　(b) 18 mA　(c) 8 mA　(d) 2 mA

6. 戴维南定理将电路变换为等效电路包括：

   (a) 一个电流源和一个串联电阻　(b) 一个电压源和一个并联电阻
   (c) 一个电压源和一个串联电阻　(d) 一个电流源和一个并联电阻

7. 求出一个给定电路的戴维南等效电压的方法为：

   (a) 短路输出端　(b) 开路输出端
   (c) 短路电压源　(d) 移除电压源并以短路代替

8. 一个给定电路，其开路两端电压为 15 V。一个 10 kΩ 负载连接在其输出端时，提供的电压为 12 V。电路的戴维南等效为：

   (a) 15 V 串联 10 kΩ　(b) 12 V 串联 10 kΩ
   (c) 12 V 串联 2.5 kΩ　(d) 15 V 串联 2.5 kΩ

9. 电源何时向负载传递最大功率？

   (a) 负载电阻很大　(b) 负载电阻很小
   (c) 负载电阻为源内阻的两倍　(d) 负载电阻与源内阻相等

10. 对自测题 8 中描述的电路，何时传递最大功率？

    (a) 10 kΩ 负载　(b) 2.5 kΩ 负载　(c) 一个无限大的负载电阻

故障检修测验

参照图 8.68

1. 如果短接 R_4, R_5 两端的电压将：

   (a) 增加　(b) 减小　(c) 不变

2. 如果 2 V 电源开路，R_1 两端的电压将：

   (a) 增加　(b) 减小　(c) 不变

3. 如果 R_2 开路，流过 R_1 的电流将：

   (a) 增加　(b) 减小　(c) 不变

参照图 8.75

4. 如果 R_L 开路,输出端对地的电压将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

5. 如果两个 5.6 kΩ 电阻中的任何一个短路,流过负载电阻的电流将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

6. 如果两个 5.6 kΩ 电阻中的任何一个短路,电源流出的电流将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

参照图 8.77

7. 如果放大器的输入对地短路,从两个电压源分得的电流将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

参照图 8.80

8. 如果 R_1 实际上是 1.0 kΩ 而不是 10 kΩ,A 和 B 两端的电压将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

9. 如果在 A 和 B 两端接上 10 MΩ 负载电阻,A 和 B 两端的电压将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

10. 如果 R_4 短路,A 和 B 两端的电压将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

参照图 8.82

11. 如果 220 Ω 电阻开路,V_{AB} 将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

12. 如果 330 Ω 电阻短路,V_{AB} 将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

参照图 8.83(d)

13. 如果 680 Ω 电阻开路,流过 R_L 的电流将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

14. 如果 47 Ω 电阻短路,R_L 两端的电压将:

(a) 增加 (b) 减小 (c) 不变

习题(较难的习题以星号标记,奇数习题的答案在本书末尾)

8.3 节 源变换

1. 一个电压源 $V_S = 300$ V, $R_S = 50$ Ω。将其变换为等效电流源。
2. 将图 8.66 中的实际电压源变换为等效电流源。

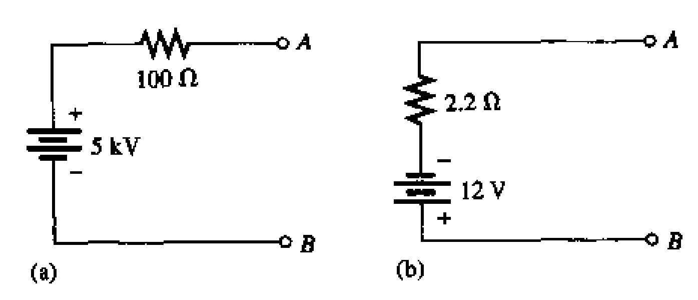


图 8.66

3. 一个电流源 $I_s=600$ mA，$R_s=1.2$ kΩ，将其变换为等效电压源。
4. 将图8.67中的实际电流源变换为等效电压源。

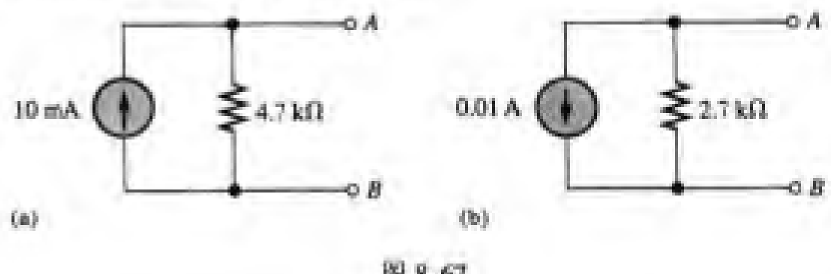


图 8.67

8.4节　叠加定理

5. 用叠加定理计算图8.68中流过 R_5 的电流。
6. 用叠加定理求得图8.68中流过 R_2 支路的电流及其两端的电压。

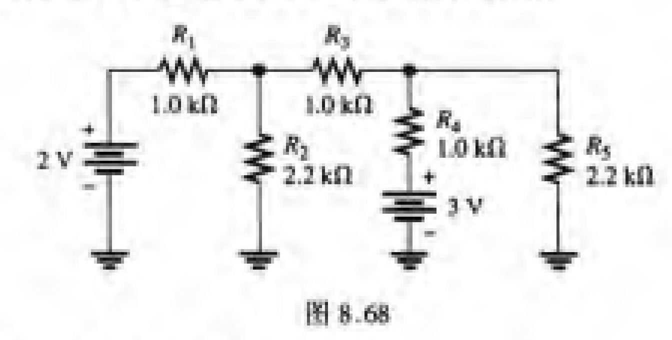


图 8.68

7. 用叠加定理求解图8.69中流过 R_3 的电流。

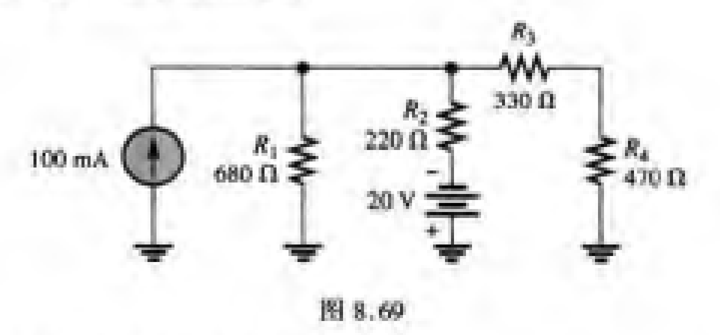


图 8.69

8. 用叠加定理求图8.70中每个电路的负载电流。

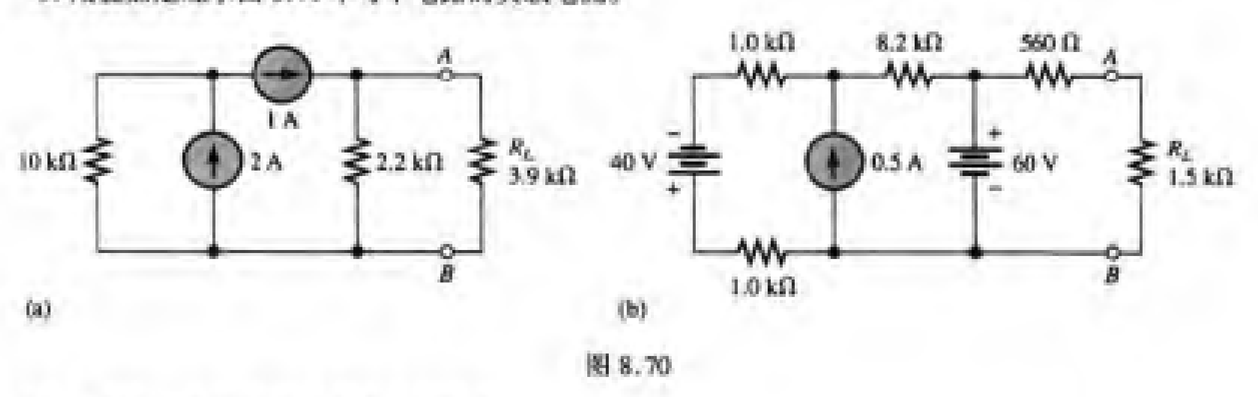


图 8.70

*9. 确定图8.71中点 A 到点 B 的电压。

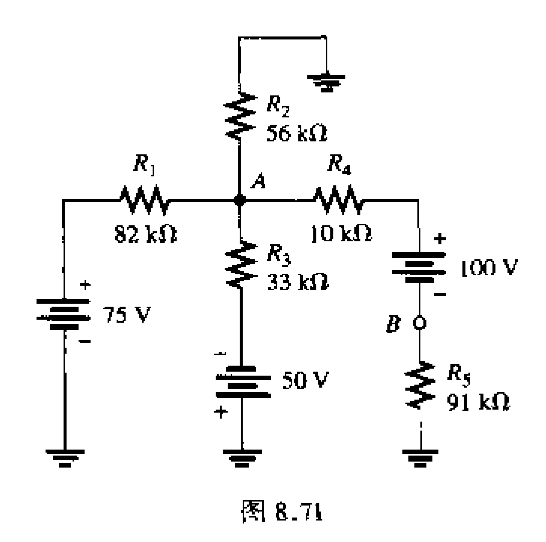


图 8.71

10. 图 8.72 中的开关相继合上,首先是 SW1。求每个开关闭合后流过 R_4 的电流。

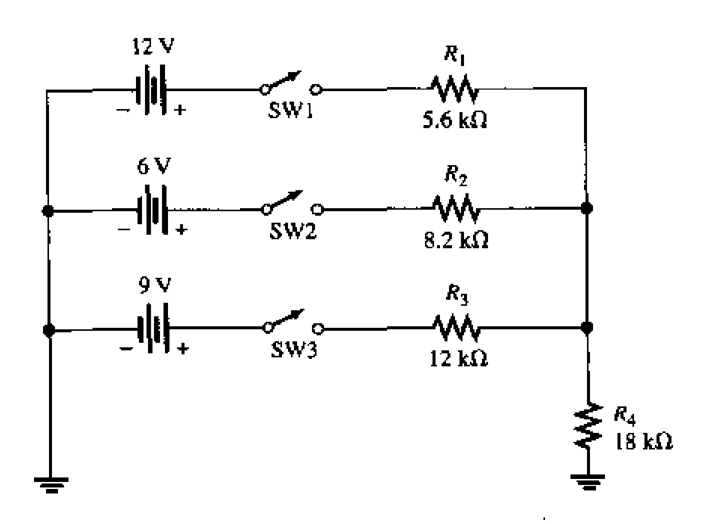


图 8.72

* 11. 图 8.73 显示出两个网络。当 A 端相连(A 到 A)和 B 端相连(B 到 B)时,确定每个电池提供的电流。

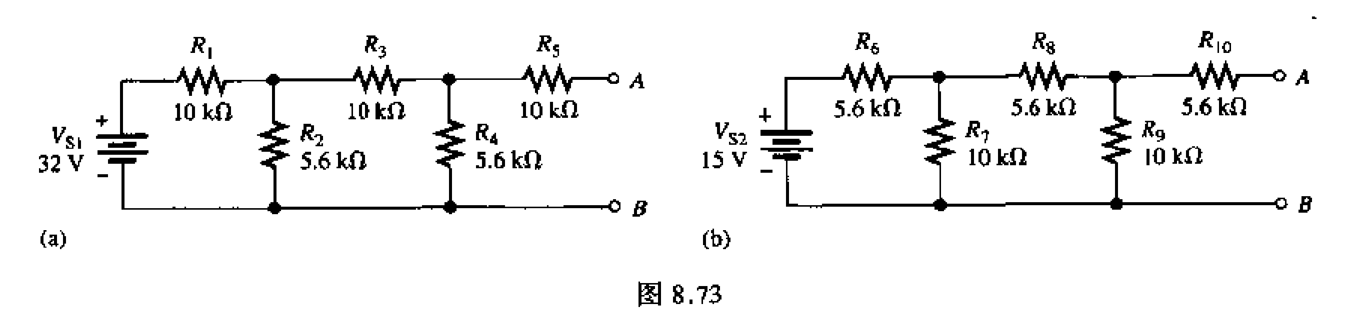


图 8.73

8.5 节 戴维南定理

12. 对图 8.74 中的每个电路,确定 R_L 两端的戴维南等效电路。

13. 用戴维南定理,确定图 8.75 中流过负载 R_L 的电流。

* 14. 用戴维南定理,确定图 8.76 中 R_4 两端的电压。

15. 求图 8.77 放大器外部电路的戴维南等效。

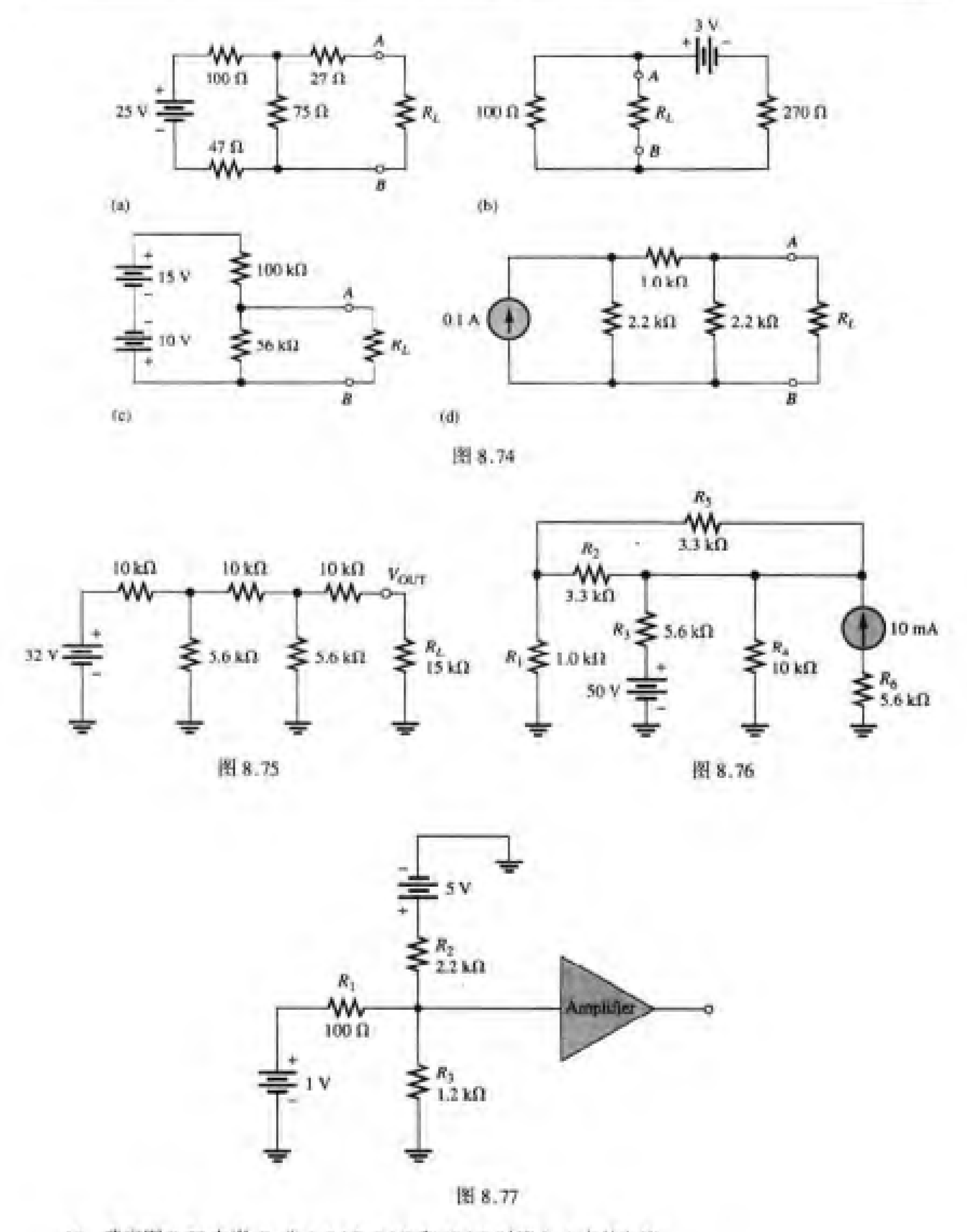


图 8.74

图 8.75

图 8.76

图 8.77

16．确定图 8.78 中当 R_L 为 1.0 kΩ、5 kΩ 和 10 kΩ 时流入 A 点的电流。

*17．求解图 8.79 所示桥式电路中流过负载电阻的电流。

18．确定图 8.80 中由 A 和 B 两端观察到的戴维南等效电路。

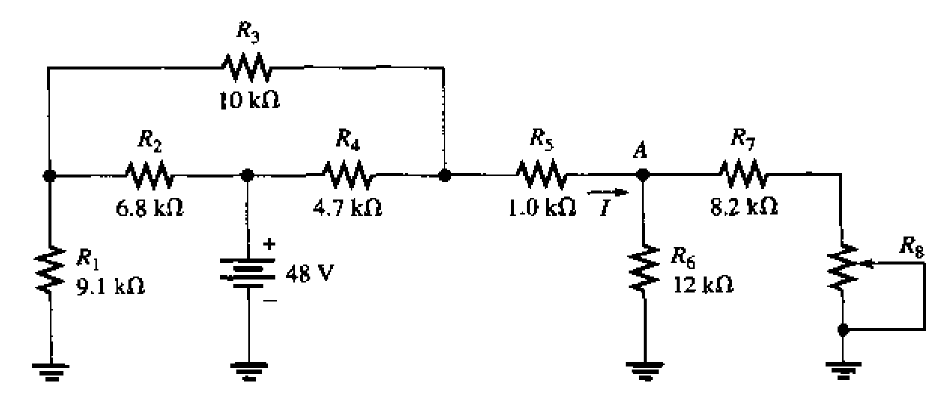


图 8.78

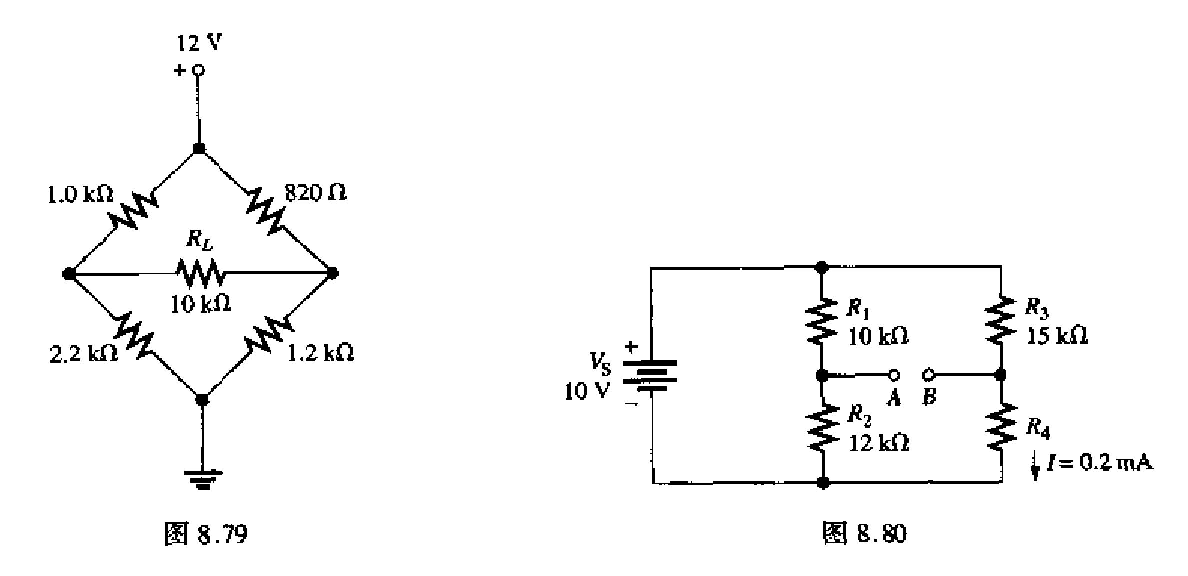


图 8.79

图 8.80

8.6 节 诺顿定理

19. 对图 8.74 中的每个电路,确定由 R_L 两端的诺顿等效电路。
20. 用诺顿定理,求图 8.75 中流过负载电阻 R_L 的电流。
*21. 用诺顿定理,求图 8.76 中 R_5 两端的电压。
22. 用诺顿定理,求图 8.78 中当 $R_8 = 8$ kΩ 时流过 R_1 的电流。
23. 确定图 8.79 中移除 R_L 后桥式电路的诺顿等效电路。
24. 将图 8.81 中 A 和 B 两端间的电路简化为其诺顿等效电路。
25. 在图 8.82 所示的电路中应用诺顿定理。

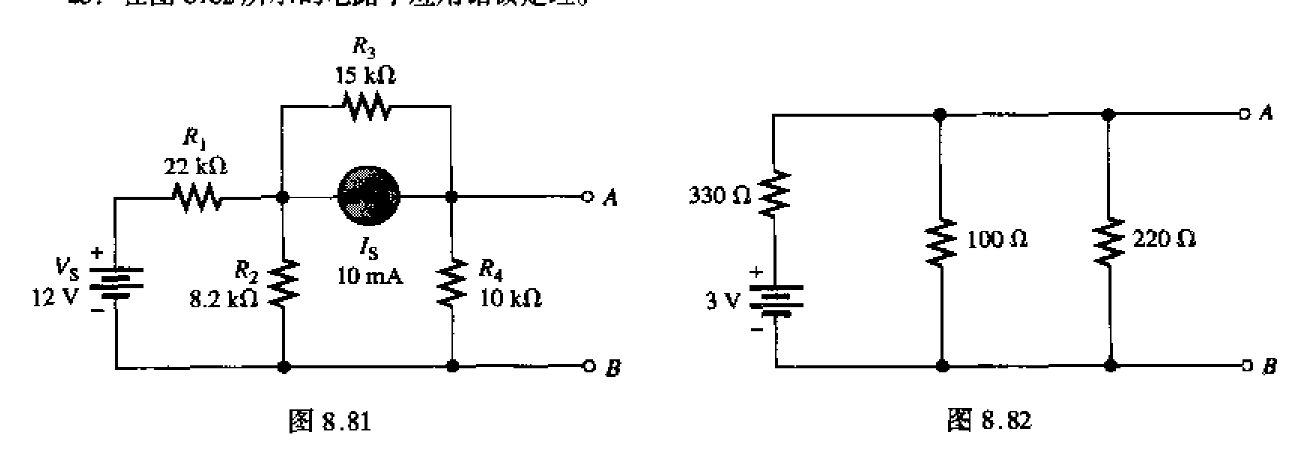


图 8.81

图 8.82

8.7 节　最大功率传递定理

26. 对图 8.83 中每个电路向负载 R_L 传递最大功率，确定每个电路中 R_L 的值。

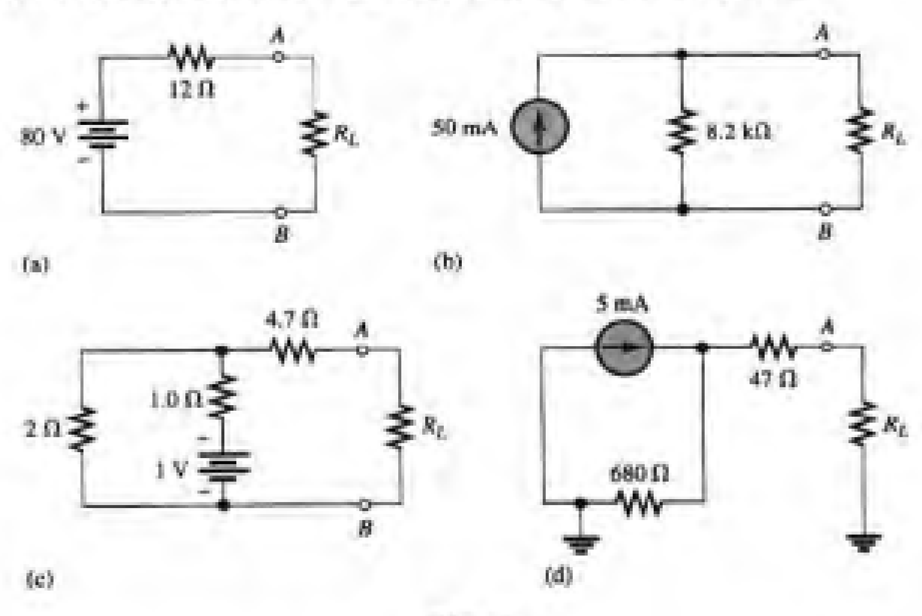


图 8.83

27. 确定图 8.84 中最大功率时 R_L 的值。

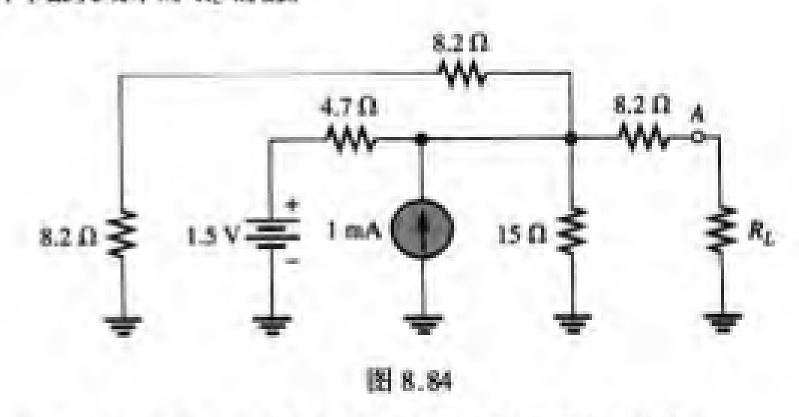


图 8.84

*28. 图 8.84 中，当 R_L 比最大功率时的值高 10%时，向负载传递多大功率？

*29. 图 8.85 中，当 R_4 和 R_{TH} 为何值时戴维南等效电路的电源向梯形网络提供最大功率？

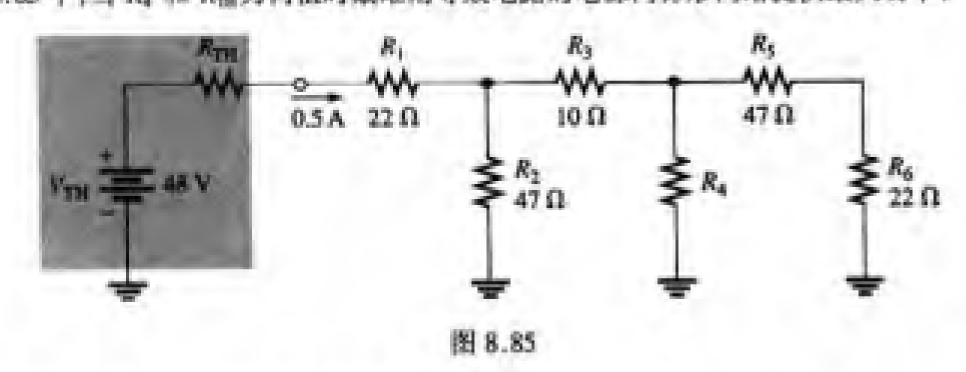


图 8.85

8.8 节　三角形－星形(Δ-Y)变换和星形－三角形(Y-Δ)变换

30. 图 8.86 中，将每个三角形网络变换为星形网络。

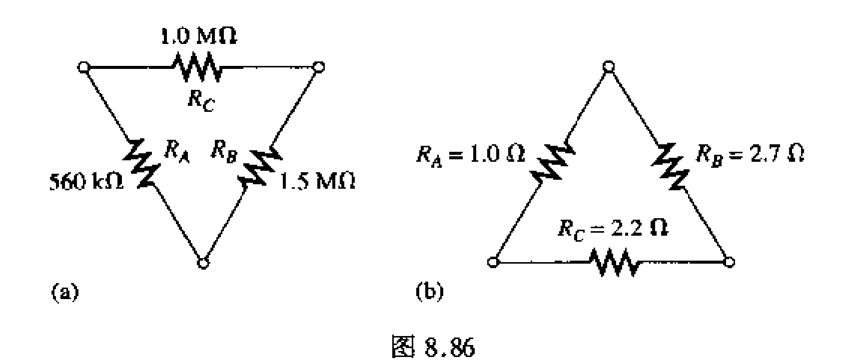


图 8.86

31. 图 8.87 中,将每个星形网络变换为三角形网络。

*32. 求图 8.88 所示电路中的所有电流。

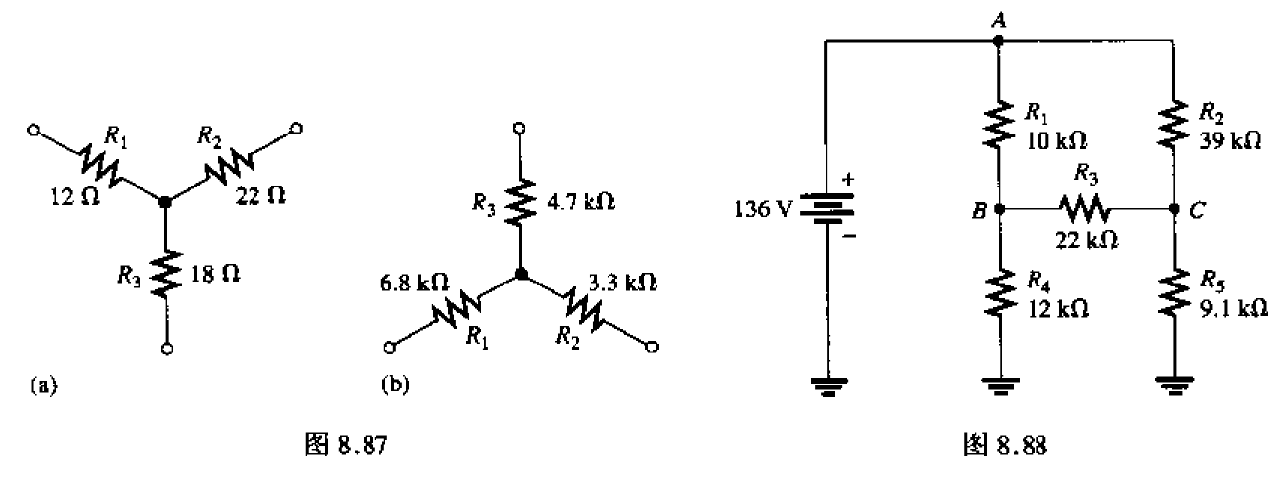


图 8.87　　　　图 8.88

EWB/Multisim 故障检修

这些问题需要应用本书附带的 EWB/Multisim 光碟。

33. 打开文件 P08.33 并检测流过每个电阻的电流是否正确,如果不正确,确定错误。
34. 打开文件 P08.34 并由测量确定 A 端和地面间电路的戴维南等效。
35. 打开文件 P08.35 并由测量确定 A 端和地面间电路的诺顿等效。
36. 打开文件 P08.36 并确定是否有错误。
37. 打开文件 P08.37 并确定为达到最大功率所需的在 A 和 B 两端接入的负载电阻值。

答案

8.1 节　直流电压源

1. 对理想电压源,参见图 8.89。
2. 对实际电压源,参见图 8.90。

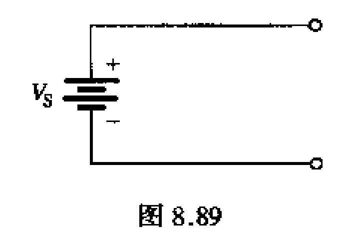


图 8.89

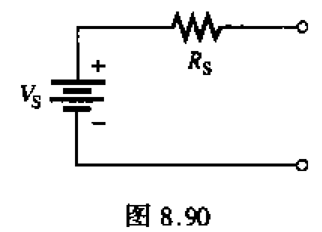


图 8.90

3. 理想电压源的内阻为零。
4. 电压源的输出电压直接随负载电阻变化。

8.2 节　电流源

1. 对理想电流源,参见图 8.91。
2. 对实际电流源,参见图 8.92。
3. 理想电流源的内阻为无穷大。
4. 负载电阻的电流随负载电阻向相反方向变化。

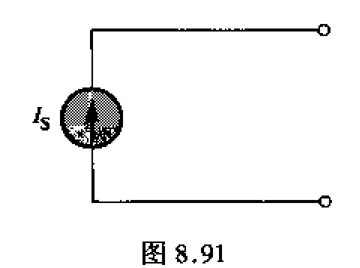


图 8.91

图 8.92

8.3 节　源变换

1. $I_S = V_S / R_S$
2. $V_S = I_S / R_S$
3. 参见图 8.93。
4. 参见图 8.94。

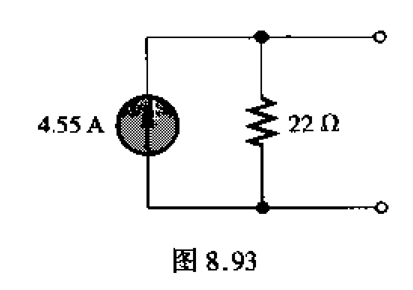


图 8.93

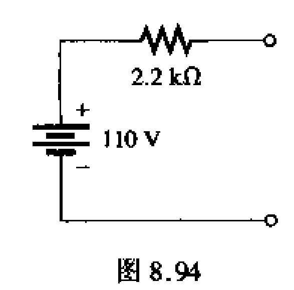


图 8.94

8.4 节　叠加定理

1. 叠加定理描述如下:多源线性电路中任何支路的总电流等于每个独立源单独作用时电流的算术和。
2. 叠加定理允许独立对待每个电源。
3. 短路表示理想电压源的内阻,开路表示理想电流源的内阻。
4. $I_{R1} = 6.67$ mA
5. 网络电流与较大电流的方向相同。

8.5 节　戴维南定理

1. 戴维南等效电路包括 V_{TH} 和 R_{TH}。
2. 戴维南等效电路的一般形式参见图 8.95。
3. V_{TH} 为电路两端的开路电压。
4. R_{TH} 为所有电源由其内阻代替后,从电路两端观察所得的电阻。
5. 参见图 8.96。

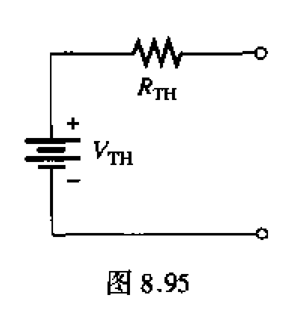


图 8.95

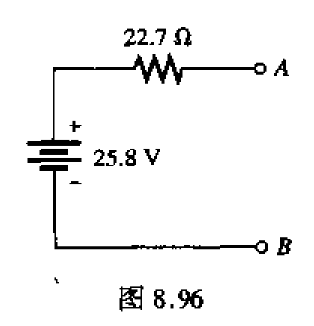


图 8.96

8.6 节 诺顿定理

1. 诺顿等效电路包括 I_N 和 R_N。
2. 戴维南等效电路的一般形式参见图 8.97。
3. I_N 为电路两端的短路电流。
4. R_N 为从电路开路两端观察所得的电阻。
5. 参见图 8.98。

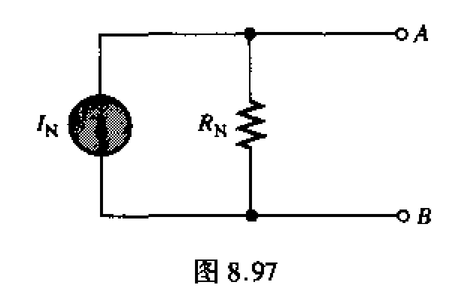


图 8.97

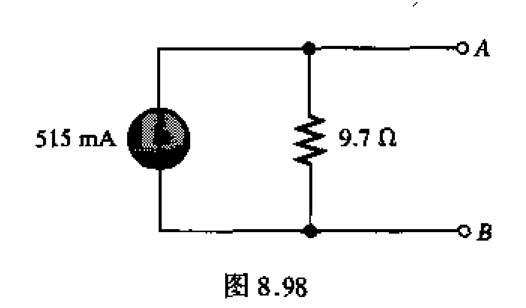


图 8.98

8.7 节 最大功率传递定理

1. 最大功率传递定理描述如下:当负载电阻等于源内阻时,电源向负载提供最大功率。
2. 当 $R_L = R_S$ 时,向负载提供最大功率。
3. $R_L = R_S = 50\ \Omega$

8.8 节 三角形-星形(Δ-Y)变换和星形-三角形(Y-Δ)变换

1. Δ 网络见参图 8.99。
2. Y 网络参见图 8.100。

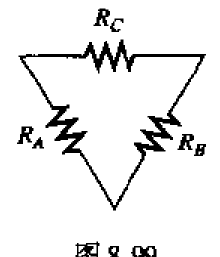


图 8.99

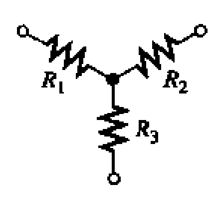


图 8.100

3. Δ-Y 变换方程式:

$$R_1 = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C} \qquad R_2 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C} \qquad R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C}$$

4. Y-Δ 变换方程式:

$$R_A = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_2} \qquad R_B = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1} \qquad R_C = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_3}$$

技术实践练习

1. 电热调节器感觉到温度的变化对电阻产生一个变化。
2. 当电桥不平衡时加热装置就开始工作。

实例相关练习

8.1 99.5 V
8.2 100 V
8.3 3.33 kΩ
8.4 1.2 A;10 Ω
8.5 300 V;600 Ω
8.6 16.6 mA
8.7 I_S 没有受影响。
8.8 70 mA
8.9 5 mA
8.10 2.36 V;124 Ω
8.11 1.17 mA
8.12 168 mA
8.13 247 Ω
8.14 $R_N = 247\ \Omega$
8.15 41.7 mW
8.16 $R_1 = 792\ \Omega, R_2 = 360\ \Omega, R_3 = 440\ \Omega$
8.17 $R_A = 712\ \Omega, R_B = 2.35\ \text{k}\Omega,\ R_C = 500\ \Omega$
8.18 3 μA

自测题

1.(b)　2.(c)　3.(a)　4.(b)　5.(d)　6.(c)　7.(b)　8.(d)　9.(d)　10.(b)

故障检修测验

1.(a)　2.(b)　3.(b)　4.(a)　5.(b)　6.(a)　7.(a)　8.(a)　9.(b)　10.(a)
11.(a)　12.(a)　13.(a)　14.(a)

第9章 支路、网孔和节点分析

引言

在上一章,我们学习了叠加定理、戴维南定理、诺顿定理、最大功率传递定理以及一些变换方法。这些定理和变换方法对于解决某些类型的电路问题是十分有用的。

本章将介绍另外三种电路分析方法。这些方法是基于欧姆定理和基尔霍夫定律的,并且在分析含有两个或两个以上的电压源或电流源的多环电路中有独特的用途。这些方法可以单独使用也可以和上一章介绍的技巧一起使用。有了经验以后,你会认识到解决特殊问题时哪一种方法最好,或者对某种方法产生个人偏好。

在支路电流法中,基尔霍夫定律用来解决多环电路中的不同支路电流问题。在电路中,一个回路是一个完整的电流路径。在多环系统分析中,行列式的方法在解决联立方程问题时是十分有用的。此外,本章还介绍了利用计算器解决联立方程的方法。利用网孔电流法,可以解决环路电流问题而不仅仅是支路电流问题。在节点电压法中,我们要利用电路中的独立节点电压解决问题。节点是两个或两个以上支路组成部分的交叉点。

本章目标

- 利用支路电流法找出电路中的未知量
- 利用行列式解决联立方程问题
- 利用计算器求解未知量联立方程问题
- 利用网孔分析法找出电路中的未知量
- 利用节点分析法找出电路中的未知量

主要术语

- 回路
- 支路
- 节点
- 行列式

技术实践

在这里,将会分析一个双极负载分压器来确定给定的电压测量是否准确。本章的方法将会在分析中用到。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料,请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

9.1 支路电流法

在支路电流法中,将利用基尔霍夫电压和电流定律找出电路每一支路的电流。找出支路电流以后,电压也随之确定了。

在完成本节学习后应该能够：

- 利用支路电流法找出电路中的未知量
- 在电路中确定回路和节点
- 建立一组支路电流方程
- 用代入法计算联立方程组

9.1.1 回路、节点和支路

图 9.1 显示的电路有两个电压源和两个回路(箭头方向为参考方向)。这个电路在本章中作为基本电路来说明三种电路分析方法。在这个电路中只有两个非冗余闭合回路(用箭头指出)。在电路中,每一个回路都是一个完整的电流路径。可以将一组非冗余闭合回路看成是一些窗户玻璃,每一块窗户玻璃代表了一个非冗余回路。另外,图中还有四个节点:A,B,C 和 D。节点 A 是两个或两个以上支路组成的结合点。支路是连接两个节点的路径。

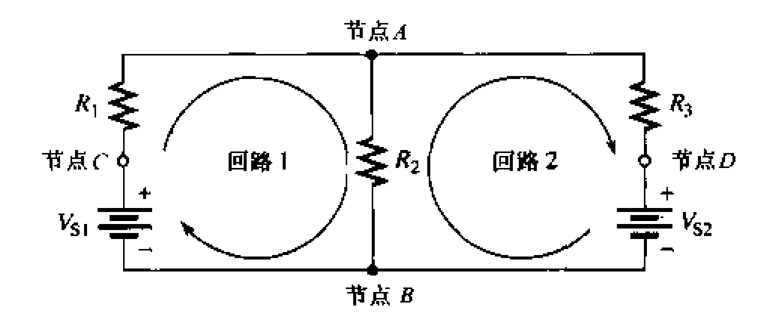


图 9.1 双回路电路中的回路和节点

以下是应用支路电流法的基本步骤。利用图 9.2 我们可以看到这些步骤是:

第一步 在每个电路支路中指定电流的参考方向。

第二步 根据支路电流的方向写出电阻电压的极性。

第三步 在每个闭合回路中应用基尔霍夫电压定律(电压代数和为零)。

第四步 在确保包含所有支路电流的最少个数节点处,分别应用基尔霍夫电流定律(节点处的电流代数和为零)。

第五步 用求解第三步和第四步时所列方程,求出支路电流值。

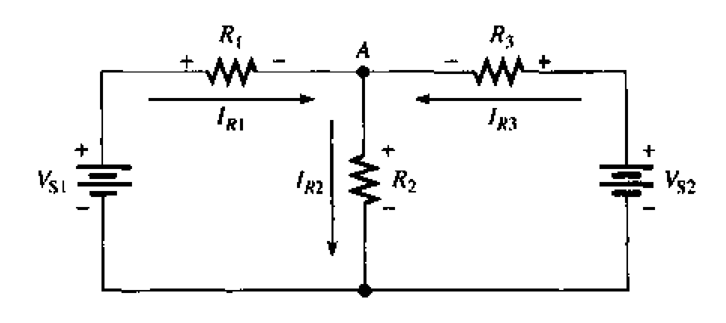


图 9.2 支路电流分析用图

首先,支路电流 I_{R1},I_{R2}和 I_{R3}的方向如图 9.2 所示。此时不用理会电流的真实方向。

其次,随着电流的方向,R_1,R_2 和 R_3 的电压极性也在变化,如图 9.2 所示。

第三,由应用于两个回路的基尔霍夫电压定理得出以下方程,电阻值是未知电流的参数:

方程 1: $R_1 I_{R1} + R_2 I_{R2} - V_{S1} = 0$ 对于回路 1

方程 2: $R_2 I_{R2} + R_3 I_{R3} - V_{S2} = 0$ 对于回路 2

第四,对于节点 A,应用基尔霍夫电流定理,要求包含所有支路电流:

方程 3: $I_{R1} - I_{R2} + I_{R3} = 0$

式中的负号表明 I_{R2}从节点流出。

第五,也是最后一步,由三个方程解出未知电流 I_{R1},I_{R2}和 I_{R3}。以上这三个方程叫做联立方程。求解该方程有两种方法:代入法和行列式法。例 9.1 用的是代入法解方程。在 9.2 节,将介绍行列式法,并且应用于求解支路电流。在下面的章节中,行列式法用于其他两种电路分析。

例 9.1 用支路电流法求解每一支路的电流,见图 9.3。

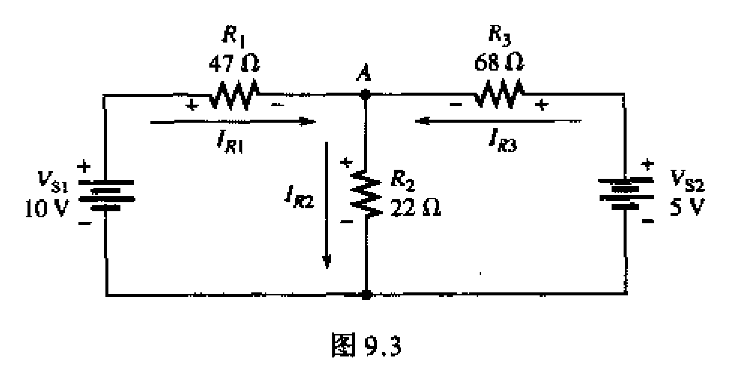


图 9.3

解:第一步 标出图 9.3 中支路电流的方向。此时,可以任意假设电流的方向。如果实际电流方向与假设相反,那么最终结果中将会正负相反。

第二步 根据图中所标电流的方向,写出电阻上电压的极性。

第三步 在左边的回路中,应用基尔霍夫电压定理,得:

$$47 I_{R1} + 22 I_{R2} - 10 = 0$$

由右边回路,得:

$$22 I_{R2} + 68 I_{R3} - 5 = 0$$

所有电阻的单位是欧姆,电压的单位是伏特。为了简化,并未标出单位。

第四步 在节点 A,电流方程为:

$$I_{R1} - I_{R2} + I_{R3} = 0$$

第五步 以下用代入法解上述方程。首先,将 I_{R1}用 I_{R2}和 I_{R3}表示。

$$I_{R1} = I_{R2} - I_{R3}$$

现在,在左回路方程中,用 $I_{R2} - I_{R3}$代替 I_{R1}。

$$47(I_{R2} - I_{R3}) + 22 I_{R2} = 10$$

$$47 I_{R2} - 47 I_{R3} + 22 I_{R2} = 10$$

$$69 I_{R2} - 47 I_{R3} = 10$$

然后,从右回路方程中解出,用 I_{R2}表示 I_{R3}。

$$22 I_{R2} = 5 - 68 I_{R3}$$

$$I_{R2} = \frac{5 - 68 I_{R3}}{22}$$

将上式中的 I_{R2}代入 $69 I_{R2} - 47 I_{R3} = 10$,得:

$$69\left(\frac{5-68I_{R3}}{22}\right)-47I_{R3}=10$$
$$\frac{345-4692I_{R3}}{22}-47I_{R3}=10$$
$$15.68-213.27I_{R3}-47I_{R3}=10$$
$$-260.27I_{R3}=-5.68$$
$$I_{R3}=\frac{5.68}{260.27}=0.0218\ \text{A}=\mathbf{21.8\ mA}$$

现在，将 I_{R3} 的值(单位为安培)代入右回路的方程。

$$22I_{R2}+68(0.0218)=5$$

解出 I_{R2}。

$$I_{R2}=\frac{5-68(0.0218)}{22}=\frac{3.52}{22}=0.16\ \text{A}=\mathbf{160\ mA}$$

将 I_{R2} 与 I_{R3} 的值代入节点 A 的方程中：

$$I_{R1}-0.16+0.0218=0$$
$$I_{R1}=0.16-0.0218=0.138\ \text{A}=\mathbf{138\ mA}$$

练习：当 5 V 电源的极性相反时，解出图 9.3 中的支路电流。

9.1 节练习

1. 在支路电流法中用到了哪些基本电路定理?
2. 当写出支路电流时，应注意方向一定要与实际方向一致。(对或错)
3. 什么是回路?
4. 什么是节点?

9.2　行列式法

在求解一些未知量时，例如求解例 9.1 中的三个支路电流，应该有与未知量个数相同的方程。在本节，要用行列式方法系统地解决两个和三个未知量的问题。这个方法与上一章介绍的代入法不同，有助于你更多地了解计算器。

完成本节的学习后，读者应该能够：

- 用行列式求解联立方程
- 建立二阶行列式求解两个联立方程组
- 建立三阶行列式求解三个联立方程组
- 利用展开法和余因子法求解行列式的值

9.2.1　求解含有两个未知数的联立方程组

为了说明这个二阶行列式方法，我们假设有两个回路方程：

$$10I_1+5I_2=15$$
$$2I_1+4I_2=8$$

为了求解 I_1 和 I_2 的值，用未知电流的系数，也就是未知量旁边的数字做出一个行列式。例如在第一个方程中，10 是 I_1 的系数，也是一个电阻的值(简略起见，省掉了单位)。

行列式的第一列是 I_1 的系数,第二列是 I_2 的系数。行列式如下:

第一列　　第二列

$$\begin{vmatrix} 10 & 5 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}$$

这称为方程组的特征行列式。

然后写出另一个行列式,并将其和特征行列式联立求解。我们将 I_1 的系数用方程组右边的常数代替,得到以下行列式:

用方程组右边的常数代替I_1的系数

$$\begin{vmatrix} 15 & 5 \\ 8 & 4 \end{vmatrix}$$

求解两个行列式,然后除以特征行列式,便可求出 I_1。利用交叉相乘和减法来求出行列式的结果。在本例中,求解特征行列式有以下两个步骤:

第一步　用左列的第一个数乘以右列的第二个数。

$$\begin{vmatrix} 10 & 5 \\ 2 & 4 \end{vmatrix} = 10 \times 4 = 40$$

第二步　用左列的第二个数乘以右列的第一个数,然后用第一步的结果减去这一乘积,便得到行列式的结果(本例中是 30)。

$$\begin{vmatrix} 10 & 5 \\ 2 & 4 \end{vmatrix} = 40 - (2 \times 5) = 40 - 10 = 30$$

对关于 I_1 的行列式重复上述步骤。

$$\begin{vmatrix} 15 & 5 \\ 8 & 4 \end{vmatrix} = 15 \times 4 = 60$$

$$\begin{vmatrix} 15 & 5 \\ 8 & 4 \end{vmatrix} = 60 - (8 \times 5) = 60 - 40 = 20$$

这个行列式的值是 20。现在,我们用 I_1 的行列式的值除以特征行列式的值,得出以下结果:

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 15 & 5 \\ 8 & 4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 10 & 5 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}} = \frac{20}{30} = 0.667\ \text{A}$$

为了求解 I_2,将 I_2 的系数替换为特征行列式中第二列的原方程组右边的常数。

用方程组右边的常数代替I_2的系数

$$\begin{vmatrix} 10 & 15 \\ 2 & 8 \end{vmatrix}$$

用此行列式的值除以特征行列式的值便得出 I_2。

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 10 & 15 \\ 2 & 8 \end{vmatrix}}{30} = \frac{(10 \times 8) - (2 \times 15)}{30} = \frac{80 - 30}{30} = \frac{50}{30} = 1.67\ \text{A}$$

例 9.2　从下列方程组解出未知电流：

$$2I_1 - 5I_2 = 10$$
$$6I_1 + 10I_2 = 20$$

解：求解特征行列式的值如下：

$$\begin{vmatrix} 2 & -5 \\ 6 & 10 \end{vmatrix} = (2)(10) - (-5)(6) = 20 - (-30) = 20 + 30 = 50$$

解 I_1 的值：

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 10 & -5 \\ 20 & 10 \end{vmatrix}}{50} = \frac{(10)(10) - (-5)(20)}{50} = \frac{100 - (-100)}{50} = \frac{200}{50} = \mathbf{4\ A}$$

解 I_2 的值：

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 10 \\ 6 & 20 \end{vmatrix}}{50} = \frac{(2)(20) - (6)(10)}{50} = \frac{40 - 60}{50} = \mathbf{-0.4\ A}$$

在电路问题中，含负号的结果表明实际电流方向与假设电流方向不一致。

注意，乘法可以用乘号表示，如 2×10，或者使用圆括号，如(2)(10)。

练习：由下列方程组解：

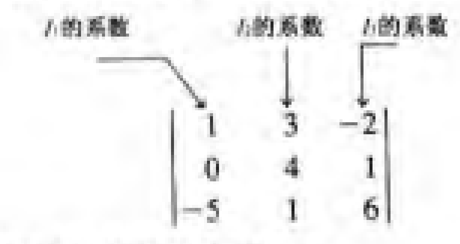
$$5I_1 + 3I_2 = 4$$
$$I_1 + 2I_2 = -6$$

9.2.2　求解含三个未知量的联立方程组

可以用展开法或余子因法求解三阶行列式。首先，看一看展开法（只能用于二阶和三阶）。三个方程如下：

$$1I_1 + 3I_2 - 2I_3 = 7$$
$$0I_1 + 4I_2 + 1I_3 = 8$$
$$-5I_1 + 1I_2 + 6I_3 = 9$$

利用以前求解二阶行列式的方法可以得到三个方程的特征行列式。共包含三列，第一列是 I_1 的系数，第二列是 I_2 的系数，第三列是 I_3 的系数，如下所示：

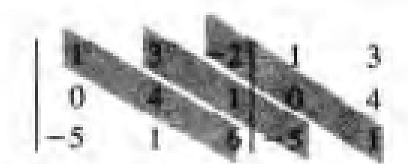


展开法　此三阶行列式用展开法求解步骤如下：

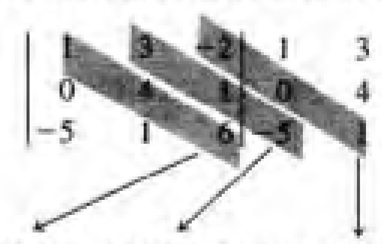
第一步　在该行列式的右边写出前两列。

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 & -2 \\ 0 & 4 & 1 \\ -5 & 1 & 6 \end{vmatrix} \begin{matrix} 1 & 3 \\ 0 & 4 \\ -5 & 1 \end{matrix}$$

第二步　对三组系数确定三条向下的对角线。

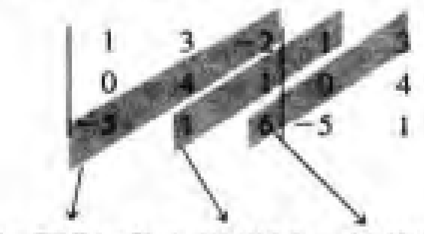


第三步 将三条对角线上的数字分别相乘,并将结果相加。



$$(1)(4)(6)+(3)(1)(-5)+(-2)(0)(1)=24+(-15)+0=9$$

第四步 对于三条向上的对角线重复第二步和第三步。

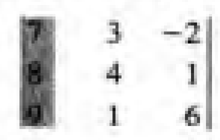


$$(-5)(4)(-2)+(1)(1)(1)+(6)(0)(3)=40+1+0=41$$

第五步 用第三步的结果减去第四步的结果,便得到特征行列式的值。

$$9-41=-32$$

为了从给出的三个方程里解出 I_1,我们将 I_1 的系数替换为特征行列式中第一列的数字。



利用刚才的步骤求出这个行列式。

$$\begin{vmatrix} 7 & 3 & -2 \\ 8 & 4 & 1 \\ 9 & 1 & 6 \end{vmatrix} \begin{matrix} 7 & 3 \\ 8 & 4 \\ 9 & 1 \end{matrix}$$

$$=[(7)(4)(6)+(3)(1)(9)+(-2)(8)(1)]-[(9)(4)(-2)+(1)(1)(7)+(6)(8)(3)]$$

$$=(168+27-16)-(-72+7+144)=179-79=100$$

用此行列式的值除以特征行列式的值便得出 I_1。负的结果说明实际电流方向与假设相反。

$$I_1=\frac{\begin{vmatrix} 7 & 3 & -2 \\ 8 & 4 & 1 \\ 9 & 1 & 6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 3 & -2 \\ 0 & 4 & 1 \\ -5 & 1 & 6 \end{vmatrix}}=\frac{100}{-32}=-3.125\text{ A}$$

用同样的方法可以得到 I_2 和 I_3。

例9.3　由下列方程组求 I_2 的值：

$$2I_1+0.5I_2+1I_3=0$$
$$0.75I_1+0I_2+2I_3=1.5$$
$$3I_1+0.2I_2+0I_3=-1$$

解：先求出特征行列式的值：

$$\begin{vmatrix}2 & 0.5 & 1\\0.75 & 0 & 2\\3 & 0.2 & 0\end{vmatrix}\begin{matrix}2 & 0.5\\0.75 & 0\\3 & 0.2\end{matrix}$$

$$=[(2)(0)(0)+(0.5)(2)(3)+(1)(0.75)(0.2)]-[(3)(0)(1)+(0.2)(2)(2)+(0)(0.75)(0.5)]$$
$$=(0+3+0.15)-(0+0.8+0)=3.15-0.8=2.35$$

再求 I_2 的行列式的值：

$$\begin{vmatrix}2 & 0 & 1\\0.75 & 1.5 & 2\\3 & -1 & 0\end{vmatrix}\begin{matrix}2 & 0\\0.75 & 1.5\\3 & -1\end{matrix}$$

$$=[(2)(1.5)(0)+(0)(2)(3)+(1)(0.75)(-1)]-[(3)(1.5)(1)+(-1)(2)(2)+(0)(0.75)(0)]$$
$$=[0+0+(-0.75)]-[4.5+(-4)+0]=-0.75-0.5=-1.25$$

最后得到：

$$I_2=\frac{-1.25}{2.35}=-0.532\text{ A}=\mathbf{-532\ mA}$$

练习：由例9.3的方程组求出 I_1 的值。

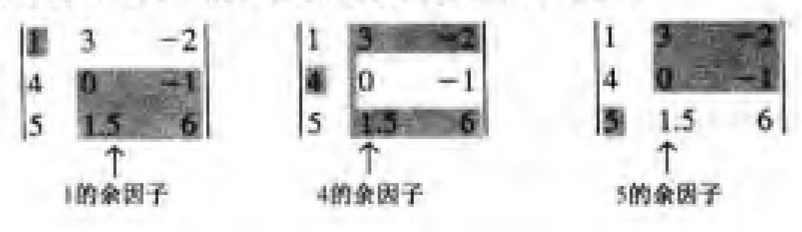
余因子法　与展开法不同，余因子法可以用于三阶以上的行列式求值，并且更加灵活。我们举一个三阶行列式的例子来说明这个方法，而四阶、五阶还有更高阶的行列式都可以用相似的步骤求出。下面用一个行列式逐步说明余因子法。

$$\begin{vmatrix}1 & 3 & -2\\4 & 0 & -1\\5 & 1.5 & 6\end{vmatrix}$$

第一步　在行列式中选择任意一列或一行。此行或此列中的每一个数字都用做乘法因子。在这里选择第一列。

$$\begin{vmatrix}\mathbf{1} & 3 & -2\\\mathbf{4} & 0 & -1\\\mathbf{5} & 1.5 & 6\end{vmatrix}$$

第二步　确定所选中的行或列中每个数字余因子。对应于每个数字余因子的是与此数字不同行也不同列的数字所组成的行列式，如下所示：



第三步 由下表确定每个乘法因子的正负号(注意符号的变化)。

$$\begin{vmatrix} + & - & + \\ - & + & - \\ + & - & + \end{vmatrix}$$

第四步 将每个乘法因子与其余因子的值的乘积加起来,注意使用合适的符号。

$$1 \times \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1.5 & 6 \end{vmatrix} - 4 \times \begin{vmatrix} 3 & -2 \\ 1.5 & 6 \end{vmatrix} + 5 \times \begin{vmatrix} 3 & -2 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

$$= 1[(0)(6) - (1.5)(-1)] - 4[(3)(6) + (1.5)(-2)] + 5[(3)(-1) + (0)(-2)]$$
$$= 1(1.5) - 4(15) + 5(-3) = 1.5 - 60 - 15 = -73.5$$

例 9.4 用余因子法计算例 9.3 中 I_2 的值,方程组如下:

$$2I_1 + 0.5I_2 + 1I_3 = 0$$
$$0.75I_1 + 0I_2 + 2I_3 = 1.5$$
$$3I_1 + 0.2I_2 + 0I_3 = -1$$

解:先求出特征行列式的值:

$$\begin{vmatrix} 2 & 0.5 & 1 \\ 0.75 & 0 & 2 \\ 3 & 0.2 & 0 \end{vmatrix} = 2 \times \begin{vmatrix} 0 & 2 \\ 0.2 & 0 \end{vmatrix} - 0.75 \times \begin{vmatrix} 0.5 & 1 \\ 0.2 & 0 \end{vmatrix} + 3 \times \begin{vmatrix} 0.5 & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix}$$

$$= 2[(0)(0) - (0.2)(2)] - 0.75[(0.5)(0) - (0.2)(1)] + 3[(0.5)(2) - (0)(1)]$$
$$= 2(-0.4) - 0.75(-0.2) + 3(1) = -0.8 + 0.15 + 3 = 2.35$$

再求 I_2 的行列式的值:

$$\begin{vmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0.75 & 1.5 & 2 \\ 3 & -1 & 0 \end{vmatrix} = 2 \times \begin{vmatrix} 1.5 & 2 \\ -1 & 0 \end{vmatrix} - 0.75 \times \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix} + 3 \times \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1.5 & 2 \end{vmatrix}$$

$$= 2[(1.5)(0) - (-1)(2)] - 0.75[(0)(0) - (-1)(1)] + 3[(0)(2) - (1.5)(1)]$$
$$= 2(2) - 0.75(1) + 3(-1.5) = 4 - 0.75 - 4.5 = -1.25$$

最后得到:

$$I_2 = \frac{-1.25}{2.35} = -0.532\ \text{A} = \mathbf{-532\ mA}$$

练习:利用余因子法求出例 9.4 的方程组中得出的 I_1 值。

9.2 节练习

1. 计算下列行列式:

$$\text{(a)} \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 4 & 8 \end{vmatrix} \qquad \text{(b)} \begin{vmatrix} 0.25 & 0.33 \\ -0.5 & 1 \end{vmatrix} \qquad \text{(c)} \begin{vmatrix} 1 & 3 & 7 \\ 2 & -1 & 7 \\ -4 & 0 & -2 \end{vmatrix}$$

2. 建立下列方程组的特征行列式:

$$2I_1 + 3I_2 = 0$$
$$5I_1 + 4I_2 = 1$$

3. 求练习 2 中的 I_2。

9.3　用计算器求解联立方程

上节已经介绍了求解联立方程的两种方法，即代入法和行列式法。在本节将学习如何用计算器求解不高于30阶的任何阶次的联立方程。只要是电路分析问题的联立方程，本节所讨论的计算器的用法都适用。

学完本节后读者应该能够：

- 用计算器求解联立方程的未知量
- 会用计算器设置30阶以下的联立方程
- 输入联立方程
- 求出未知变量的值
- 编辑方程组

9.3.1　输入联立方程

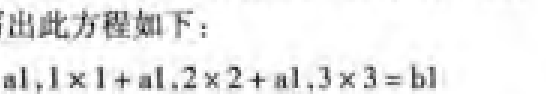
以下步骤用来在TI-86计算器上输入联立方程。

第一步　按[2nd]键，屏幕出现SIMULT，如图9.4所示。



图9.4　第一步的示图

第二步　输入联立方程的个数然后按[ENTER]键。以三个方程为例，第一个方程系数输入如图9.5(a)所示。数a1,1是第一个方程的第一个系数，a1,2是第一个方程的第二个系数，依次类推。方程显示在最上面一行：a1,1×1…a1,3×3＝b1。完整写出此方程如下：



$$a1,1\times 1+a1,2\times 2+a1,3\times 3=b1$$

×1，×2和×3是未知变量，b1是常数。

第三步　键入每一个系数的值，从a1,1到a1,3以及b1。每一次输入后按[ENTER]键。如果在输入完最后一个系数后按[ENTER]键或用[F2]键选择NEXT，第二个方程和系数就显示出来了，如图9.5(b)所示。键入每一个系数的值，从a2,1到a2,3以及b2。对第三个方程重复以上步骤，如图9.5(c)所示。



(a)



(b)



(c)

图9.5

9.3.2　解方程组

按照第一步到第三步输入完系数之后，按[F5]键选择SOLVE。×1，×2和×3的值就显示出来了。

9.3.3 编辑方程组

按[F1]键选择 COEFS,可以更改任何方程的系数。你将会看到第一个方程的输入画面。输入完当前画面的系数,会跳至下一画面。

例 9.5 用 TI-86 计算器解下列方程:

$$8I_1+4I_2+1I_3=7$$
$$2I_1-5I_2+6I_3=3$$
$$3I_1-3I_2-2I_3=-5$$

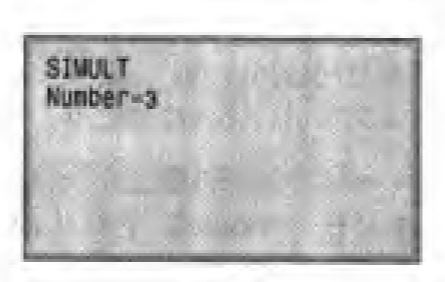
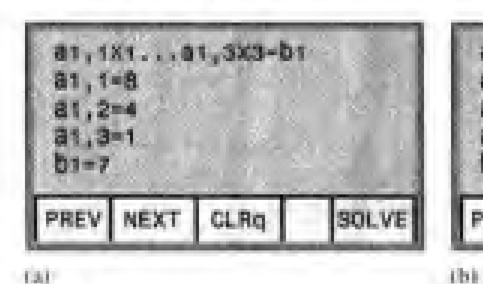
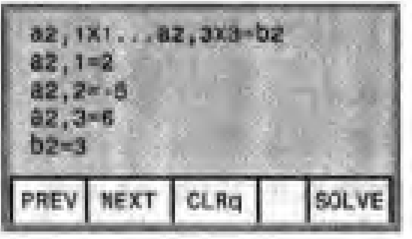


图 9.6

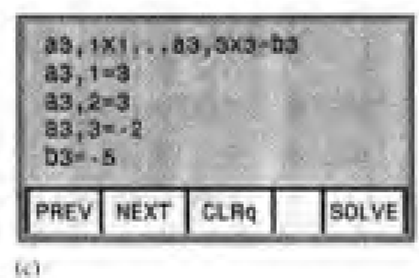
解:按[2nd]键,出现 SIMULT,然后输入方程的个数,如图 9.6 所示。输入 3 后按[ENTER]键,进入第一个方程画面。输入系数 8,4,1 和常数 7 后分别按[ENTER]键,结果如图 9.7(a)所示。输入完最后一个数并按[ENTER]键后进入第二个方程的画面。输入系数 2,-5,6 和常数 3 后的画面如图 9.7(b)所示(负值的输入要先按[(-)]键)。最后,输入方程三的系数(3,3,-2)和常数-5,结果如图 9.7(c)所示。



(a)



(b)



(c)

图 9.7

按[F5]键选择 SOLVE。结果如图 9.8 所示。x1 是 I_1,x2 是 I_2,x3 是 I_3。

练习:编辑方程组将 a1,2 由 4 改为-3;将 a2,3 由 6 改为 2.5;将 b3 由-5 改为 8,然后解此改过的方程。



图 9.8

9.3 节练习

1. 用计算器解下列方程组,求出 I_1,I_2,I_3 和 I_4。

$$100I_1+220I_2+180I_3+330I_4=0$$
$$470I_1+390I_2+100I_3+100I_4=12$$
$$120I_1-270I_2+150I_3-180I_4=-9$$
$$560I_1+680I_2-220I_3+390I_4=0$$

2. 改变问题 1 的系数,将第一个方程的常数改为 8.5,将第二个方程中 I_3 的系数改为 220,第四个方程将 I_1 的系数改为 330。然后解新的方程组。

9.4 网孔电流法

在网孔电流法中,采用回路电流而不是支路电流。支路电流是实际流过支路的电流,可以用电表测量出来。回路电流则不同,是为了比支路电流法简单而假设的电路分析的数学量。“网孔”一词的得来是因为多环电路画出来的效果可以设想为线路的网孔而得名。

学完本节后读者应该能够:

- 利用网孔分析法求解电路中的未知量
- 画出回路电流
- 对每个回路应用基尔霍夫电压定律
- 列出回路(网孔)方程组
- 解回路方程组

利用网孔分析法的系统步骤如下,如图 9.9(同支路电流法图 9.1 相似)所示。

第一步　尽管回路电流可以任选,但是对于每一个非冗余闭合回路,经常选择顺时针为正方向。这有可能不是实际方向,但没有关系。回路电流的数量必须包括电路中的所有部分。

第二步　根据每个回路的电流方向确定电压降的方向。

第三步　对每个闭合回路应用基尔霍夫电压定律。当有其他回路的电流通过同一部分时,都要包含其电压降。这样就确定了一个回路有一个方程。

第四步　用代入法或行列式解回路电流方程。

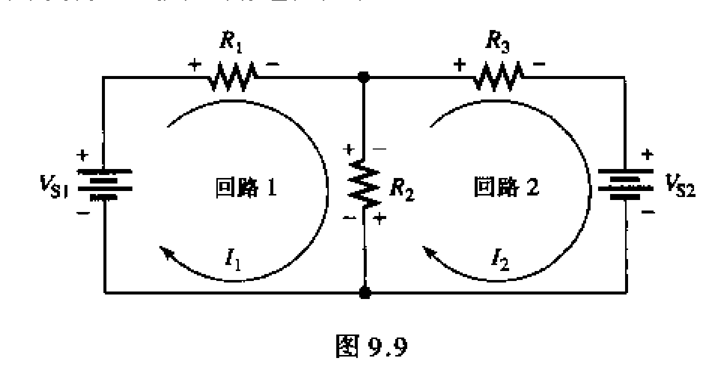


图 9.9

首先,标出回路电流 I_1 和 I_2 为顺时针方向,如图 9.9 所示。回路电流也可以沿电路的外周标记另一个回路电流,但是因为 I_1 和 I_2 已经流过了所有部分,所以电路外周的回路电流是多余的。

其次,R_1,R_2 和 R_3 的电压极性由回路电流方向来确定。注意到因为 R_2 在两个回路中,所以和流过 R_2 的 I_1 和 I_2 方向不一样,因此有两个电压极性。在实际中,R_2 的电流不可能分为两个部分。但是,记住回路电流是为了使分析简便而假设的数学量。电压源的极性是固定的,不受回路电流方向的影响。

第三,对两个回路应用基尔霍夫电压定律,得到以下两个方程:

$$R_1 I_1 + R_2(I_1 - I_2) = V_{S1} \qquad \text{对于回路 1}$$

$$R_3 I_2 + R_2(I_2 - I_1) = -V_{S2} \qquad \text{对于回路 2}$$

注意,在回路一中 I_1 为正,在回路二中 I_2 为正。

第四,移项合并同类项,将 I_1 项放在第一位,将 I_2 项放在第二位,如下所示。算出回路电流时,所有的支路电流就随之确定了。

$$(R_1 + R_2)I_1 - R_2 I_2 = V_{S1} \qquad \text{对于回路 1}$$

$$-R_2 I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = -V_{S2} \qquad \text{对于回路 2}$$

注意,对于用支路电流法需要三个方程的电路,用网孔电流法只要两个方程就能求解。最后两个方程的形式(第四步)能使网孔分析法更简便。观察最后两个方程,对于回路一,总电阻 $R_1 + R_2$ 与此回路的电流 I_1 相乘,而与其他回路公共的电阻 R_2 则与其他回路电流 I_2 相乘,然后用第一项来减。方程二的形式一样,只是各项的位置有所变化。从以上分析可见,第一步到第四步可以简化为下述规则:

(回路电阻之和)乘以(回路电流)减去(公共电阻)乘以(临近回路电流)等于(回路源电压)。

例 9.6 在用网孔法分析电路时应用了此规则。

例 9.6 用网孔电流法求解支路电流,如图 9.10 所示。

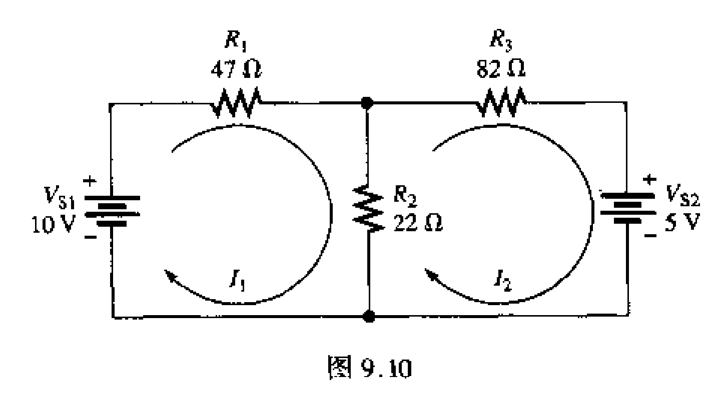


图 9.10

解: 标出回路电流 I_1 和 I_2,如图 9.10 所示;电阻单位是欧姆,电压单位是伏特。利用刚才的规则列出回路方程组:

$$(47 + 22)I_1 - 22I_2 = 10$$

$$69I_1 - 22I_2 = 10 \qquad \text{对于回路1}$$

$$-22I_1 + (22 + 82)I_2 = -5$$

$$-22I_1 + 104I_2 = -5 \qquad \text{对于回路2}$$

利用行列式解出 I_1:

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 10 & -22 \\ -5 & 104 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 69 & -22 \\ -22 & 104 \end{vmatrix}} = \frac{(10)(104) - (-5)(-22)}{(69)(104) - (-22)(-22)} = \frac{1040 - 110}{7176 - 484} = 139 \text{ mA}$$

解得 I_2:

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 69 & 10 \\ -22 & -5 \end{vmatrix}}{6692} = \frac{(69)(-5) - (-22)(10)}{6692} = \frac{-345 - (-220)}{6692} = -18.7 \text{ mA}$$

结果的负号说明假设方向与 I_2 的实际方向相反。

现在求解实际的支路电流。因为是 I_1 流过 R_1 的惟一电流,所以也是支路电流 I_{R1}。

$$I_{R1} = I_1 = \mathbf{139\ mA}$$

因为 I_2 是流过 R_3 的惟一电流,所以也是支路电流 I_{R3}。

$$I_{R3} = I_2 = \mathbf{-18.7\ mA}(\text{与 } I_2 \text{ 所设方向相反})$$

两个回路电流 I_1 和 I_2 都同向地通过 R_2。记住,I_2 结果的负值告诉我们应该改变它的假设方向。

$$I_{R2} = I_1 - I_2 = 139 \text{ mA} - (-18.7 \text{ mA}) = \mathbf{158\ mA}$$

若已知支路电流，就能由欧姆定律求出电压。

练习：用计算器求解回路电流。

9.4.1 多于两个回路的电路

网孔电流法能系统地应用到含有任意回路的电路中。当然，回路越多越复杂。不过可以用计算器大大简化运算，但是仍然用基本的程序。例如三回路电路中将列出三个方程，如例 9.7 所示。

例 9.7 由图 9.11 求 I_3。

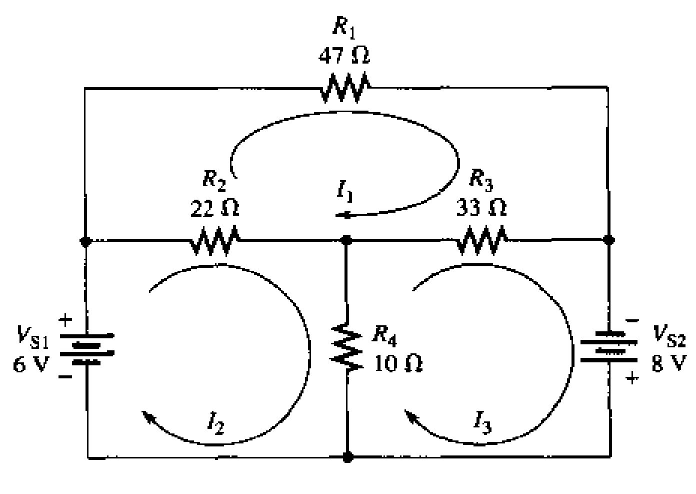


图 9.11 例 9.7 的示图

解：标出三个回路电流为顺时针方向（I_1，I_2 和 I_3），如图 9.11 所示。用上述规则列出回路方程。当网孔电流没有正端时，由电压源的正端确定。回路方程是：

$$102I_1 - 22I_2 - 33I_3 = 0 \qquad \text{对于回路 1}$$

$$-22I_1 + 32I_2 - 10I_3 = 6 \qquad \text{对于回路 2}$$

$$-33I_1 - 10I_2 + 43I_3 = 8 \qquad \text{对于回路 3}$$

可以用代入法求解上述方程组，或者更简单地用三阶行列式。

用行列式求 I_3。首先，计算特征行列式。

$$\begin{vmatrix} 102 & -22 & -33 \\ -22 & 32 & -10 \\ -33 & -10 & 43 \end{vmatrix} = 102 \times \begin{vmatrix} 32 & -10 \\ -10 & 43 \end{vmatrix} - (-22) \times \begin{vmatrix} -22 & -33 \\ -10 & 43 \end{vmatrix} + (-33) \times \begin{vmatrix} -22 & -33 \\ 32 & -10 \end{vmatrix}$$

$$= 102[(32)(43) - (-10)(-10)] - (-22)[(-22)(43) - (-10)(-33)] + (-33)[(-22)(-10) - (32)(-33)]$$

$$= 102(1276) + 22(-1276) - 33(1276) = 130\,152 - 28\,072 - 42\,108 = 59\,972$$

然后，计算 I_3 的行列式。

$$\begin{vmatrix} 102 & -22 & 0 \\ -22 & 32 & 6 \\ -33 & -10 & 8 \end{vmatrix} = 102 \times \begin{vmatrix} 32 & 6 \\ -10 & 8 \end{vmatrix} - (-22) \times \begin{vmatrix} -22 & 0 \\ -10 & 8 \end{vmatrix} + (-33) \times \begin{vmatrix} -22 & 0 \\ 32 & 6 \end{vmatrix}$$

$$= 102[(32)(8) - (-10)(6)] + 22[(-22)(8) - (-10)(0)] - 33[(-22)(6) - (32)(0)]$$

$$= 102(316) + 22(-176) - 33(-132) = 32\,232 - 3872 + 4356 = 32\,716$$

用 I_3 的行列式值除以特征行列式的值 I_3,得。

$$I_3=\frac{32\,716}{59\,972}=\mathbf{546\ mA}$$

用同样的方法可得其他的回路电流,然后便可求得实际的支路电流和电压值。

练习:用计算器求解上题。

9.4 节练习

1. 回路电流是否代表了实际的支路电流?
2. 解回路电流时出现了负值,说明了什么?
3. 网孔电流法用了什么电路定理?

9.5 节点电压法

另外一种分析多环电路的方法叫做节点电压法,是建立在基尔霍夫电流定律求解节点电压基础上的。节点是两个或两个以上支路的交汇点。

学完本节后读者应该能够:

- 用节点电压法求解电路中的未知量
- 选择未知电压的节点,并标出电流
- 对每个节点应用基尔霍夫电流定律
- 列出并求解节点方程组

用于电路分析的节点电压法的一般步骤如下:

第一步 确定节点的个数。

第二步 选定一个节点为参考节点,所有电压都与其相关。标出每一个未知电压节点处的电压名称。

第三步 标出未知电压节点各支路的电流,方向任意。

第四步 在每个节点处对标记电流应用基尔霍夫电流定理。

第五步 将电流的方程用电压表示,解用欧姆定律表示为未知节点电压的方程。

我们用图 9.12 来说明节点电压法的一般方法。

首先,建立节点。本题有 4 个节点,如图所示。其次,以节点 B 作为参考节点,将其当做电路的接地点。节点 C 和节点 D 的电压是已知的电压源电压。只有 A 点电压未知,标为 V_A。第三,任意标出节点 A 的支路电流方向,如图中所示。第四,节点 A 处的基尔霍夫电流方程如下:

$$I_{R1}-I_{R2}+I_{R3}=0$$

第五,用欧姆定律将电流用电压表示。

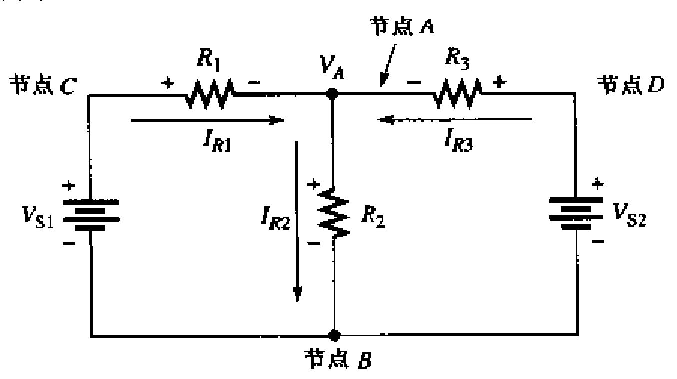


图 9.12 节点电压分析用图

$$I_{R1}=\frac{V_1}{R_1}=\frac{V_{S1}-V_A}{R_1}$$

$$I_{R2}=\frac{V_2}{R_2}=\frac{V_A}{R_2}$$

$$I_{R3}=\frac{V_3}{R_3}=\frac{V_{S3}-V_A}{R_3}$$

将这些项代入电流方程，得：

$$\frac{V_{S1}-V_A}{R_1}-\frac{V_A}{R_2}+\frac{V_{S2}-V_A}{R_3}=0$$

只有 V_A 未知，移项合并同类项解此方程。求出电压后，便可以算出所有的支路电流。我们用例 9.8 来进一步说明这个方法。

例 9.8　解出节点电压 V_A，如图 9.13 所示。

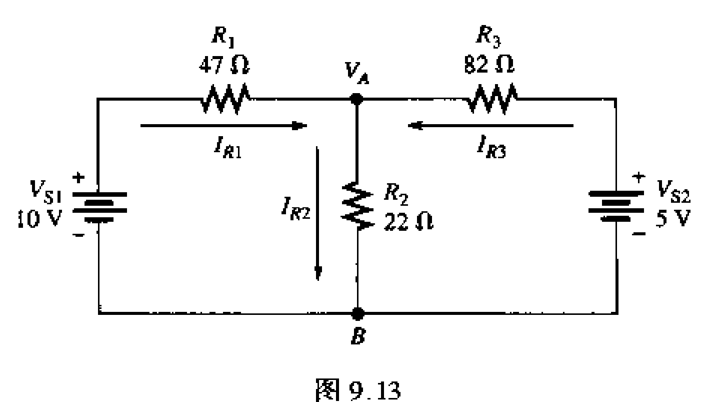


图 9.13

解：选择 B 为参考节点，只有一个未知节点电压为 V_A，如图 9.13 所示。标记节点 A 处的电流方向。电流方程为：

$$I_{R1}-I_{R2}+I_{R3}=0$$

利用欧姆定律，用电压来代替电流。

$$\frac{10-V_A}{47}-\frac{V_A}{22}+\frac{5-V_A}{82}=0$$

整理得：

$$\frac{10}{47}-\frac{V_A}{47}-\frac{V_A}{22}+\frac{5}{82}-\frac{V_A}{82}=0$$

$$-\frac{V_A}{47}-\frac{V_A}{22}-\frac{V_A}{82}=-\frac{10}{47}-\frac{5}{82}$$

为求 V_A，合并同类项得：

$$\frac{1804V_A+3854V_A+1034V_A}{84\,788}=\frac{820+235}{3854}$$

$$\frac{6692V_A}{84\,788}=\frac{1055}{3854}$$

$$V_A=\frac{(1055)(84\,788)}{(6692)(3854)}=\mathbf{3.47\ V}$$

练习：当电压源变为 5 V 时，计算 V_A。如图 9.13 所示。

用同样的步骤，可以分析多于一个未知节点电压的电路。例 9.9 为计算两个未知节点的电压。

例 9.9　用节点分析法计算 V_A 和 V_B，如图 9.14 所示。

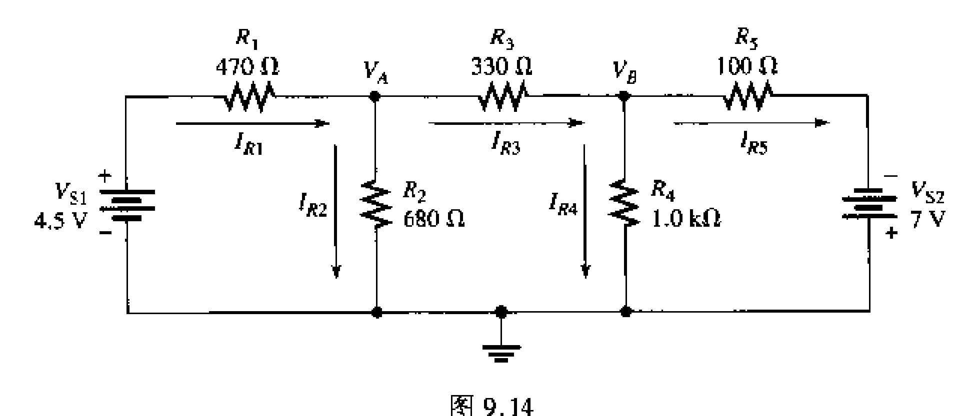


图 9.14

解：首先标出支路电流的方向，如图 9.14 所示。然后在每个节点处应用基尔霍夫电流定理。在节点 A，

$$I_{R1} - I_{R2} - I_{R3} = 0$$

利用欧姆定律代换电流：

$$\left(\frac{4.5 - V_A}{470}\right) - \left(\frac{V_A}{680}\right) - \left(\frac{V_A - V_B}{330}\right) = 0$$

$$\frac{4.5}{470} - \frac{V_A}{470} - \frac{V_A}{680} - \frac{V_A}{330} + \frac{V_B}{330} = 0$$

$$\left(\frac{1}{470} + \frac{1}{680} + \frac{1}{330}\right)V_A - \left(\frac{1}{330}\right)V_B = \frac{4.5}{470}$$

然后，用计算器求出最后一个方程的系数和常数。得节点 A 的方程为：

$$0.006\,63 V_A - 0.003\,03 V_B = 0.009\,57$$

在节点 B，

$$I_{R3} - I_{R4} - I_{R5} = 0$$

同样，用欧姆定律代换。

$$\left(\frac{V_A - V_B}{330}\right) - \left(\frac{V_B}{1000}\right) - \left(\frac{V_B - (-7)}{100}\right) = 0$$

$$\frac{V_A}{330} - \frac{V_B}{330} - \frac{V_B}{1000} - \frac{V_B}{100} - \frac{7}{100} = 0$$

$$\left(\frac{1}{330}\right)V_A - \left(\frac{1}{330} + \frac{1}{1000} + \frac{1}{100}\right)V_B - \frac{7}{100}$$

解出系数和常数。节点 B 的方程是：

$$0.003\,03\ V_A - 0.014\,03\ V_B = 0.07$$

然后由两个节点方程解出 V_A 和 V_B，用行列式法求解。

$$V_A = \frac{\begin{vmatrix} 0.009\,57 & -0.003\,03 \\ 0.07 & -0.014\,03 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.006\,63 & -0.003\,03 \\ 0.003\,03 & -0.014\,03 \end{vmatrix}} = \frac{(0.009\,57)(-0.014\,03) - (0.07)(-0.003\,03)}{(0.006\,63)(-0.014\,03) - (0.003\,03)(-0.003\,03)} = \mathbf{-928\ mV}$$

$$V_B = \frac{\begin{vmatrix} 0.006\,63 & 0.009\,57 \\ 0.003\,03 & 0.07 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.006\,63 & -0.003\,03 \\ 0.003\,03 & -0.014\,03 \end{vmatrix}} = \frac{(0.006\,63)(0.07) - (0.003\,03)(0.009\,57)}{(0.006\,63)(-0.014\,03) - (0.003\,03)(-0.003\,03)} = \mathbf{-5.19\ V}$$

练习：用计算器解 V_A 和 V_B 得节点方程组。

9.5 节练习

1. 节点电压法基于哪个电路定理?
2. 参考节点是什么?

技术实践

双极负载分压器的分析给我们提供了一个应用本章分析方法的机会。这里所讲的双极分压器是利用两个电压源进行工作的,分别为 +9 V 和 −9 V。这两个电压源提供正电压和负电压,为两个不同的装置提供参考电压。

这里遇到的分压器是用两个 9 V 电池提供电压的。一个装置要求正的参考电压并为分压器提供 27 kΩ 的负载。另一个装置要求负的参考电压并为分压器提供 15 kΩ 的负载。该双极电压分割器的原理图如图 9.15 所示。

做在 PC 板上的自备电池的分压器如图 9.16 所示。两个电池直接夹在板上并且连线到印刷电路板上。这个双负载装置可以连接到终端上。

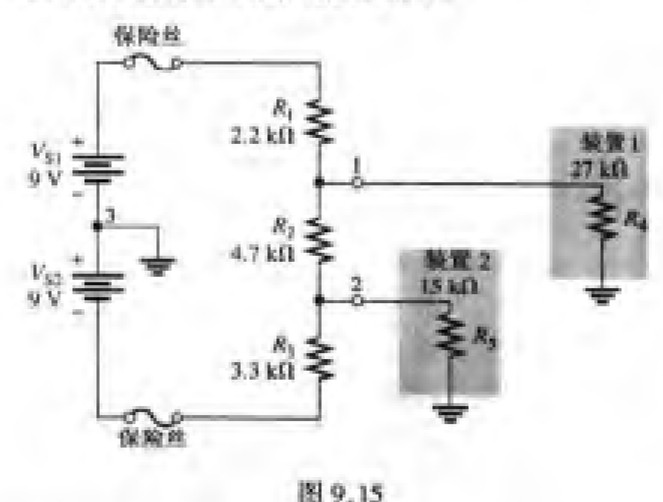


图 9.15



图 9.16

印刷电路板和原理图

- 检查 PC 板(参见图 9.16),看它是否与图 9.15 中的原理图一致。在板上按原理图连接输入/输出和其他部分。

分析和解决问题

- 参考图 9.17,看看电压表的读数是否正确。输出电压是在未连接负载时测得的。

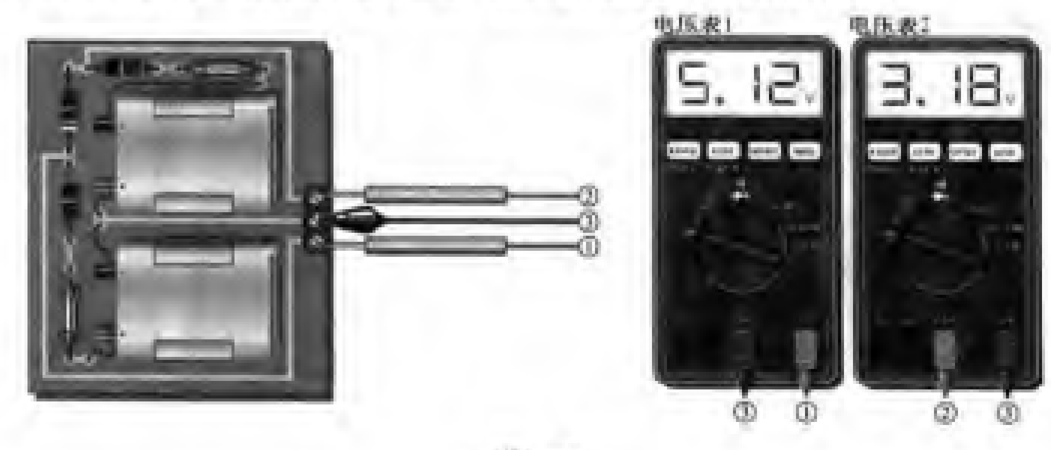


图 9.17

■ 参考图 9.18,利用节点电压法判断电压表读数是否正确。可能要把原理图改画成更熟悉的形式。输出电压在连接 27 kΩ 负载后由输出口 1 测量,来模拟连接分压器的其中一个装置。



图 9.18

■ 参考图 9.19,应用节点电压法判断电压表的读数是否正确。可能要把原理图改画成更熟悉的形式。输出电压在连接 27 kΩ 负载后由输出口 1 测量,15 kΩ 的负载接到输出口 2,来模拟连接分压器的两个装置。

■ 如果在图 9.19 中电压表 1 的读数为 +7.50 V,电压表 2 的读数为 +5.71 V,问题出在哪里?

■ 如果在图 9.19 中电压表 1 的读数为 +8.27 V,电压表 2 的读数为 -7.38 V,问题出在哪里?



图 9.19

技术实践练习

1. 判断分压器电路保险丝熔断的最小值。
2. 如果每个电池为 10 Ah,分压器电路在无负载的情况下能工作多长时间?

小结

■ 支路电流法是基于基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律的。

■ 联立方程可以用代入法、行列式法和计算器求解。

■ 方程的个数必须与未知量的个数相等。

■ 二阶行列式可以用交叉乘法求解。

■ 三阶行列式可以用展开法或余因子法求解。

- 网孔电流法是基于基尔霍夫电压定律的。
- 回路电流不一定是真正流过支路的电流。
- 节点电压法是基于基尔霍夫电流定律的。

主要术语

支路:连接两节点的电流路径。
行列式:给定一组联立方程的系数和常数的阵列。
回路:电路中的闭合电流路径。
节点:两个或两个以上支路的连接点。

自测题

1. 假设图 9.1 中的电压源值已知,那么:
   (a) 3 个非冗余回路　(b) 1 个未知节点　(c) 2 个非冗余回路
   (d) 2 个未知节点　(e) (b)(c)均正确
2. 在标出支路电流时
   (a) 方向很重要　(b)必须方向一致
   (c) 必须都指向一个节点　(d)方向不重要
3. 支路电流法采用了:
   (a) 欧姆定律和基尔霍夫电压定律
   (b) 基尔霍夫电压定律和电流定律
   (c) 置换定理和基尔霍夫电流定律
   (d) 戴维南定理和基尔霍夫电压定律
4. 两个联立方程的特征行列式将有:
   (a) 2 行 1 列　(b) 1 行 2 列　(c) 2 行 2 列
5. 一个行列式第一行为 2 和 4,第二行为 6 和 1,其值为:
   (a) 22　(b) 2　(c) −22　(d) 8
6. 求行列式的展开法
   (a) 仅适合于二阶行列式　(b) 仅适合于二阶和三阶行列式
   (c) 适用于任意行列式　(d)比余因子法好
7. 网孔电流法基于:
   (a) 基尔霍夫电流定律　(b) 欧姆定律
   (c) 置换定理　(d) 基尔霍夫电压定律
8. 节点电压法基于:
   (a) 基尔霍夫电流定律　(b)欧姆定律
   (c) 置换定理　(d) 基尔霍夫电压定律
9. 在节点电压法中,
   (a) 电流在每个节点处标出
   (b) 电流在参考节点处标出
   (c) 电流方向是任意的
   (d) 电流仅在未知节点处标出
   (e) (c)和(d)均正确
10. 一般而言,节点电压法会出现:
    (a) 比网孔电压法更多的方程

(b) 比网孔电压法更少的方程

(c) 与网孔电流法方程个数相同的方程

故障检修测验

参考图 9.21

1. 如果 R_2 开路，则通过 R_3 的电流将：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变
2. 如果 6 V 电源短路，A 点对地的电压将：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变
3. 如果 R_2 没有和地相连，A 点对地的电压将：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

参考图 9.22

4. 若电流源未工作，则流过 R_2 的电流将：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变
5. 如果 R_2 开路，则通过 R_3 的电流将：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

参考图 9.25

6. 如果 R_1 开路，A 和 B 端的电压将会：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变
7. 如果 R_3 换成 10 Ω 电阻，则 V_{AB} 将：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变
8. 如果 B 端接至电源负极，则 V_{AB} 将：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变
9. 如果负极接地，则 V_{AB} 将：
   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

参考图 9.27

10. 如果电压源 V_{S2} 未工作，则 A 点对地电压将：
    (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变
11. 如果 A 点与地短接，则流过 R_3 的电流将：
    (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变
12. 如果 R_2 开路，则 R_3 上的电压将：
    (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

习题(较有难度的题目标有星号，奇数号题的答案在本书最后)

9.1 节　支路电流法

1. 指出图 9.20 中可能的非冗余回路。

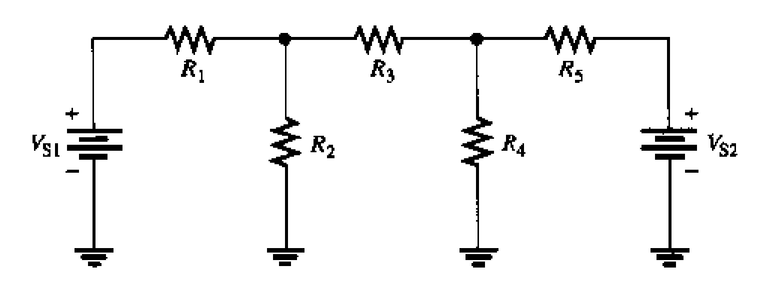


图 9.20

2. 指出图 9.20 中的所有节点，并说明哪些节点的电压已知？
3. 写出节点 A 的基尔霍夫电流方程，电路如图 9.21 所示。
4. 解出图 9.21 中每一条支路的电流。
5. 解出图 9.21 中每个电阻的电压降，并标出实际方向。

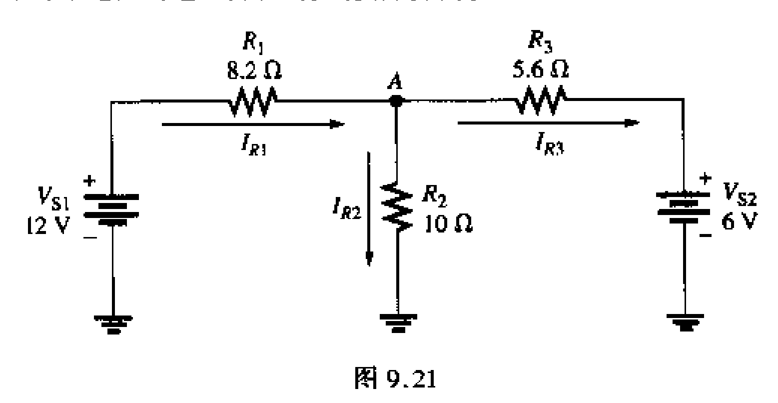


图 9.21

6. 用代入法解出 I_{R1} 和 I_{R2}。

$$100I_{R1}+50I_{R2}=30$$
$$75I_{R1}+90I_{R2}=15$$

7. 用代入法解出所有电流。

$$5I_{R1}-2I_{R2}+8I_{R3}=1$$
$$2I_{R1}+4I_{R2}-12I_{R3}=5$$
$$10I_{R1}+6I_{R2}+9I_{R3}=0$$

*8. 求图 9.22 中流过每个电阻的电流。
9. 求图 9.22 中电流源两端的电压。

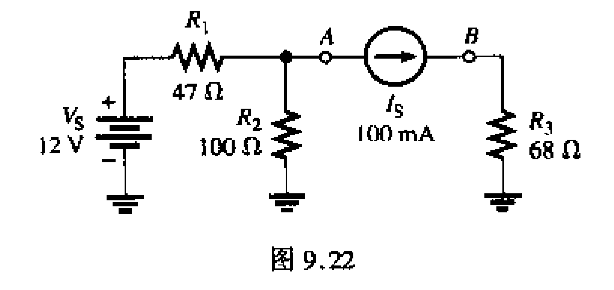


图 9.22

9.2 节　行列式法

10. 求行列式的值：

(a) $\begin{vmatrix}4 & 6\\2 & 3\end{vmatrix}$　(b) $\begin{vmatrix}9 & -1\\0 & 5\end{vmatrix}$　(c) $\begin{vmatrix}12 & 15\\-2 & -1\end{vmatrix}$　(d) $\begin{vmatrix}100 & 50\\30 & -20\end{vmatrix}$

11. 用行列式求解两电流：

$$-I_1+2I_2=4$$
$$7I_1+3I_2=6$$

12. 用展开法求下列行列式的值：

(a) $\begin{vmatrix}1 & 0 & -2\\5 & 4 & 1\\2 & 10 & 0\end{vmatrix}$　(b) $\begin{vmatrix}0.5 & 1 & -0.8\\0.1 & 1.2 & 1.5\\-0.1 & -0.3 & 5\end{vmatrix}$

13. 用余因子法求下列行列式的值：

(a) $\begin{vmatrix}25 & 0 & -20\\10 & 12 & 5\\-8 & 30 & -16\end{vmatrix}$　(b) $\begin{vmatrix}1.08 & 1.75 & 0.55\\0 & 2.12 & -0.98\\1 & 3.49 & -1.05\end{vmatrix}$

14. 求例 9.3 中的 I_1 和 I_3。
15. 由下列方程组解 I_1，I_2 和 I_3：

$$2I_1-6I_2+10I_3=9$$
$$3I_1+7I_2-8I_3=3$$
$$10I_1+5I_2-12I_3=0$$

*16. 由下列方程组解 V_1, V_2, V_3 和 V_4:

$$16V_1 + 10V_2 - 8V_3 - 3V_4 = 15$$
$$2V_1 + 0V_2 + 5V_3 + 2V_4 = 0$$
$$-7V_1 - 12V_2 + 0V_3 + 0V_4 = 9$$
$$-1V_1 + 20V_2 - 18V_3 + 0V_4 = 10$$

9.3 节 用计算器求解联立方程

17. 用计算器解习题 6 的联立方程。
18. 用计算器解习题 7 的联立方程。
19. 用计算器解习题 15 的联立方程。
20. 用计算器解习题 16 的联立方程。

9.4 节 网孔电流法

21. 用网孔电流法解图 9.23 中的回路电流。
22. 解图 9.23 中的支路电流。
23. 解图 9.23 中每个电阻的电压并判断极性。

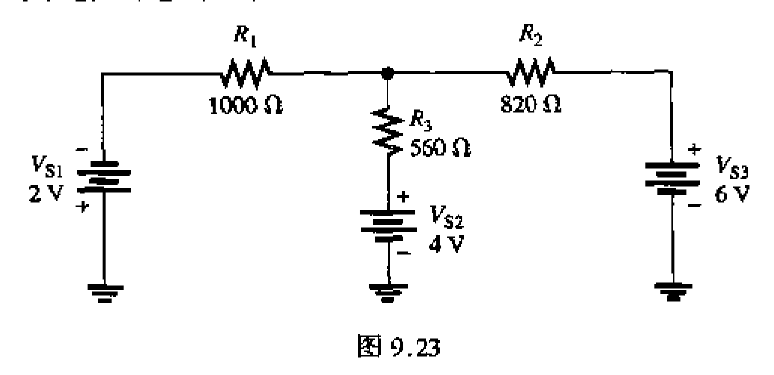


图 9.23

24. 写出图 9.24 所示电路的回路方程组。
25. 用计算器解图 9.24 中的方程组。
26. 求图 9.24 中每个电阻的电流。

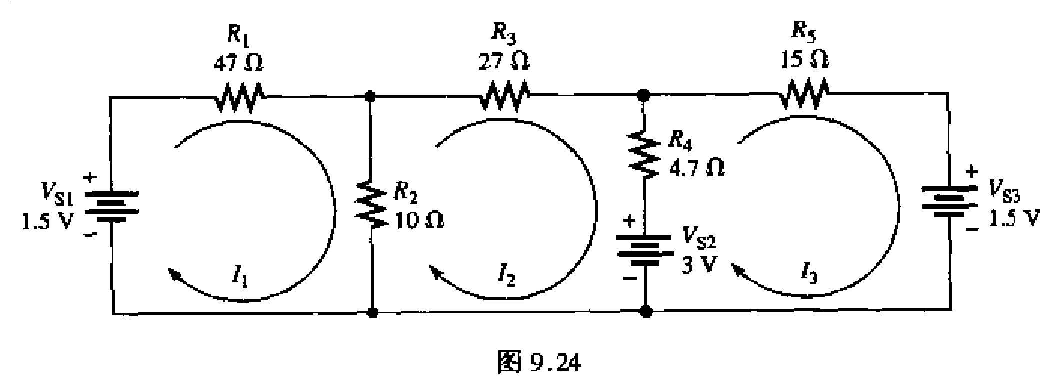


图 9.24

27. 求图 9.25 中 A 点和 B 点的电压值。
28. 求当图 9.25 中 A 点和 B 点接 10 Ω 电阻时流过的电流。
29. 求图 9.26 中流过 R_1 的电流。

9.5 节 节点电压法

30. 在图 9.27 中用节点电压法求 A 点相对于地的电压。
31. 图 9.27 中的支路电流值是多少? 标出每条支路中电流的实际方向。

32. 写出图9.24中的节点电压方程，用计算器求解节点电压。

图9.25

图9.26

图9.27

33. 用节点分析法求 A 点和 B 点相对于地的电压，电路如图9.28所示。

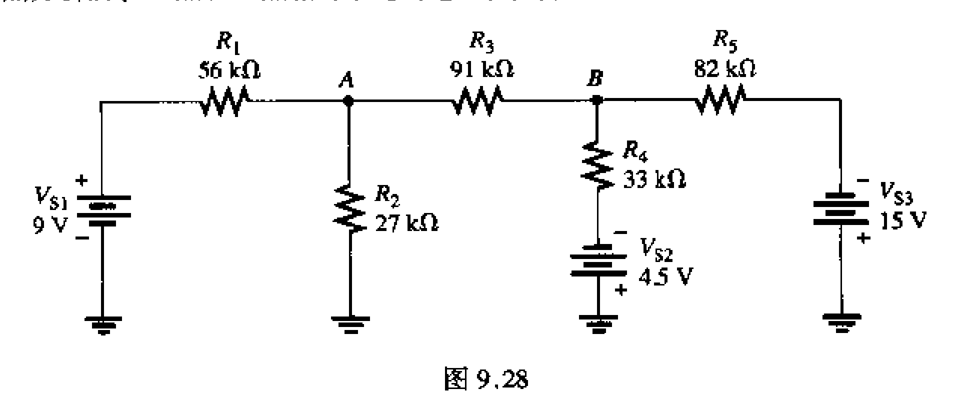


图9.28

*34. 求 A 点、B 点和 C 点的电压，电路如图9.29所示。

*35. 用节点分析法、网孔分析法或其他方法求图9.30中所有未知节点的电压和电流。

EWB/Multisim 故障检修

这些问题需要本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

36. 打开文件 P09.36，求出流过每个电阻的电流。

37. 打开文件 P09.37，求出流过每个电阻的电流。

38. 打开文件 P09.38，求出节点 A 和节点 B 相对于地的参考电压。

39. 打开文件 P09.39，判断是否有错，如果有，请指出。

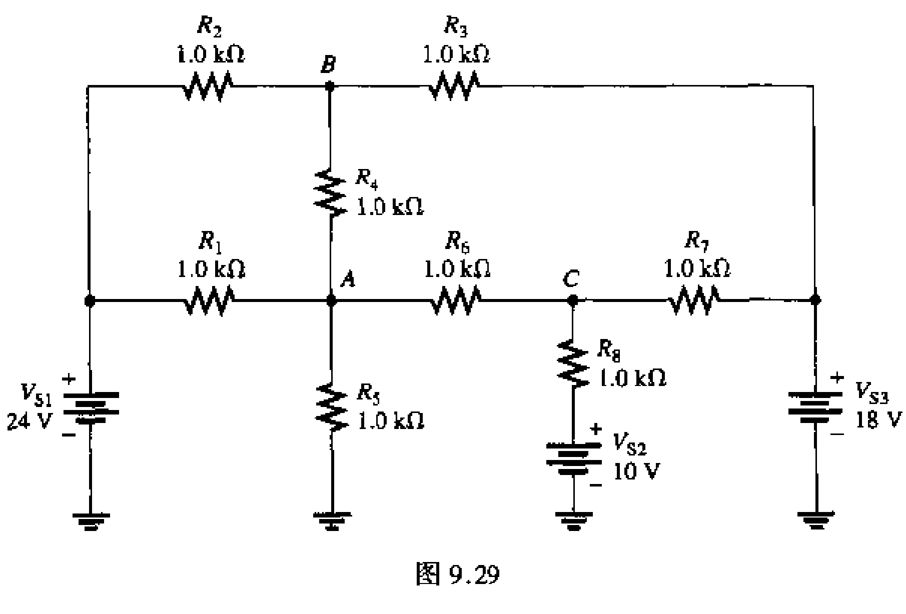


图 9.29

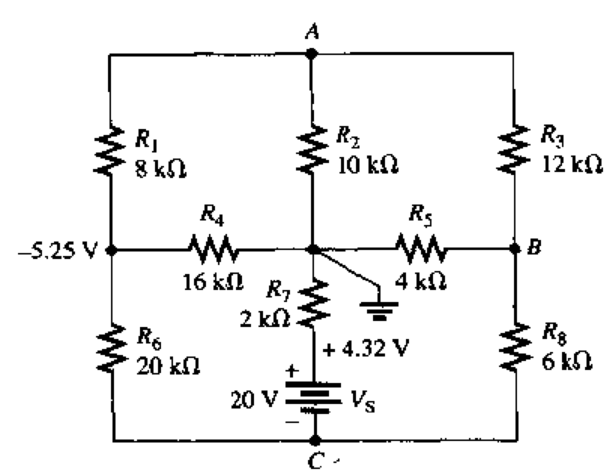


图 9.30

40. 打开文件 P09.40,求输出口 1 和输出口 2 相对于地的电压。
41. 打开文件 P09.41,判断是什么错误。
42. 打开文件 P09.42,判断是什么错误。
43. 打开文件 P09.43,判断是什么错误。

答案

9.1 节 支路电流法

1. 在支路电流法中用到了基尔霍夫电压定律和电流定律。
2. 错。但要按着你标记的方向列出方程组。
3. 回路是电路中的闭合路径。
4. 节点是两个或两个以上部分的结合点。

9.2 节 行列式法

1. (a) 4 (b) 0.415 (c) −98
2. $\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 4 \end{vmatrix}$
3. −0.286 A = −286 mA

9.3节　用计算器求解联立方程

1. $I_1 = -.038893513289$
   $I_2 = .084110232475$
   $I_3 = .041925798204$
   $I_4 = -.067156192401$
2. $I_1 = -.056363148617$
   $I_2 = .07218287729$
   $I_3 = .065684612774$
   $I_4 = -.041112571034$

9.4节　网孔电流法

1. 不对，回路电流不一定是支路电流。
2. 负值的意思是方向应该相反。
3. 网孔分析法中用到了基尔霍夫电压定律。

9.5节　节点电压法

1. 基尔霍夫电流定律是节点分析法的基础。
2. 参考节点是为电路中所有电压提供参考的结合点。

技术实践

1. $I_1 = 1.9$ mA；保险丝最小熔断电流为 1.9 mA。
2. 10 Ah/1.76mA = 5682 h

实例相关练习

9.1 $I_{R1} = 176$ mA；$I_{R2} = 77.8$ mA；$I_{R3} = -98.7$ mA

9.2 3.71 A

9.3 −298 mA

9.4 −298 mA

9.5 $X_1 = -1.76923076923$；$X_2 = -18.5384615385$；$X_3 = -34.4615384615$

9.6 $I_1 = X_1 = .1389719067 54(\approx 139\text{ mA})$；$I_2 = X_2 = -.0186790197 25(\approx -18.7\text{ mA})$

9.7 $I_1 = X_1 = .2978723404 26(\approx 298\text{ mA})$；$I_2 = X_2 = .5627626225 57(\approx 563\text{ mA})$；
$I_3 = X_3 = .5455212432 47(\approx 546\text{ mA})$

9.8 1.92 V

9.9 $V_A = X_1 = -.9283725756 82(\approx -928\text{ mV})$；$V_B = X_2 = -5.1898053388 7(\approx -5.19\text{V})$

自测题

1.(e)　2.(d)　3.(b)　4.(c)　5.(c)　6.(b)　7.(d)　8.(a)　9.(e)　10.(b)

故障检修测验

1.(a)　2.(b)　3.(a)　4.(a)　5.(c)　6.(b)　7.(a)　8.(a)　9.(c)　10.(b)
11.(b)　12.(b)

第 10 章　磁场和电磁场

引言

本章讨论的重点与前九章的直流电路有所不同，因为在这里将介绍两个新的概念：磁场和电磁场。许多装置如继电器、螺线管和喇叭的操作都与磁场和电磁场理论有关。

电磁场概念的引入对第 14 章介绍的电路组成部分的感应器或线圈是非常重要的。那时，复习本章将对你很有帮助。

两种不同的磁铁分别是永久磁铁和电磁铁。在没有励磁的情况下，永久磁铁的两极有恒定的磁力线。当有电流通过时，电磁铁才会产生磁场。电磁铁一般是一个由磁性材料作为铁心的线圈。

本章目标

- 解释磁场的原理
- 解释电磁场的原理
- 描述一些电磁装置的工作原理
- 解释磁滞现象
- 讨论电磁感应的原理
- 讨论一些电磁感应的应用

主要术语

- 磁场
- 磁力线
- 磁通量
- 韦伯(Wb)
- 高斯
- 电磁场
- 导磁性
- 磁阻
- 磁通势(mmf)
- 安培匝数(At)
- 螺线管
- 继电器
- 喇叭
- 磁滞
- 保持力
- 感应电压(v_{ind})
- 感应电流(i_{ind})
- 电磁感应
- 法拉第定律
- 楞次定律

技术实践

在技术实践中，将会介绍电磁继电器是如何在防盗警报装置中应用的，并且你将学会检查基本警报系统的程序。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

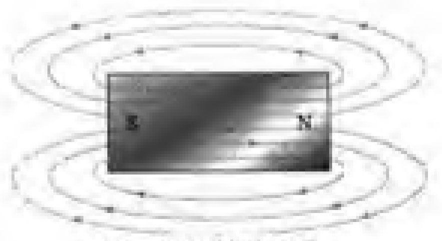
10.1　磁场

围绕永久磁铁存在一个磁场。在磁性材料中，由磁铁的北极(N)射向南极(S)后又回到北极的磁力线的集合可以想像成磁场。

学完本章后读者应该能够：

- 解释磁场的原理
- 定义磁通量
- 定义磁通密度
- 讨论材料是否可以磁化
- 解释磁开关是如何工作的

永久磁铁如图 10.1 所示，包围着一个由磁力线或磁通线组成的磁场。为了清楚起见，图中只画了一小部分磁力线。可以想像在三维空间中充满了磁力线。这些线尽可能细并且混合在一起，但相互之间并不相交。这样就在磁铁旁形成了连续的磁场。

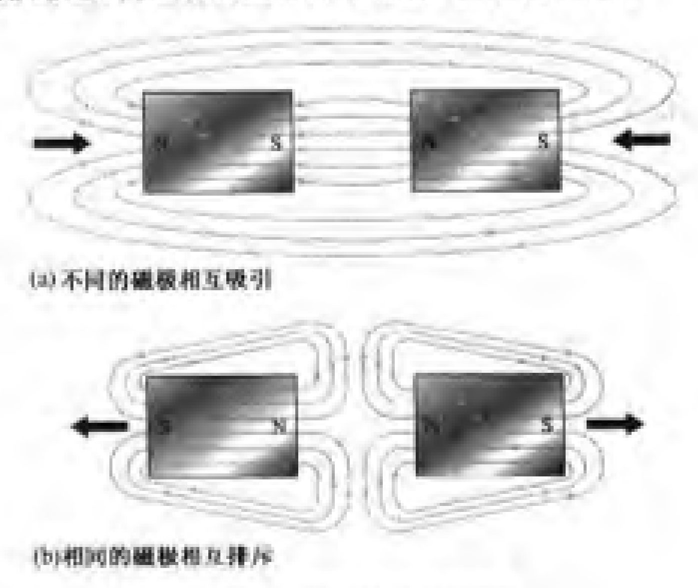


环线只代表磁场中大量磁力线中的一小部分

图 10.1 磁铁周围的磁力线

10.1.1 磁极的吸引和排斥

两块磁铁的不同极靠近时，磁场会产生吸引力，如图 10.2(a)所示。当同极靠近时，磁场会互相排斥，如图 10.2(b)所示。



(a) 不同的磁极相互吸引

(b) 相同的磁极相互排斥

图 10.2 磁极的吸引和排斥

10.1.2 改变磁场

当一个非磁性材料（如纸、玻璃、木头或塑料）放在磁场里时，磁力线不会改变，如图 10.3(a)所示。但是当一个磁性材料（如铁）放在磁场中时，磁力线会改变路线，从铁中通过而不是从空气中通过。因为铁比空气更容易建立起磁路。图 10.3(b)说明了这个原理。磁力线通过铁或其他材料路径的问题是在屏蔽杂散电流影响中要注意的问题。

10.1.3 磁通

一块磁铁由北极向南极的磁力线组合称为磁通，用符号 ϕ（希腊字母）表示。磁场中磁力线的数量决定了磁通量的值。磁力线越多，磁通越大，磁场越强。

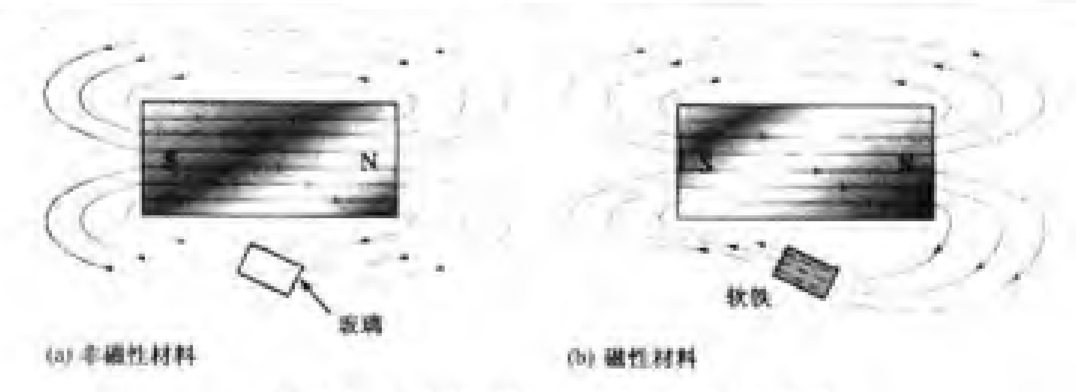


图 10.3 非磁性材料和磁性材料对磁场的作用

磁通量的单位是韦伯(Wb)。一韦伯等于 10^8 条磁通线。韦伯是非常大的单位,因此在实际情况中通常用微韦伯(μWb)。一微韦伯等于 100 条磁通线。

10.1.4 磁通密度

磁通密度是磁场中垂直于磁力线的单位面积中磁通量的大小,符号为 B,国际单位是特斯拉(T)。一特斯拉等于一韦伯每平方米(Wb/m^2)。公式如下:

$$B = \frac{\phi}{A} \tag{10.1}$$

ϕ是磁通量,A 是磁场的横截面积,用平方米(m^2)表示。

例 10.1 磁场中 0.1 m^2 面积中的磁通量为 800 μWb,求磁通密度。

解:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{800\ \mu\text{Wb}}{0.1\ \text{m}^2} = \mathbf{8000\ \mu T}$$

练习:当 $B = 4700\ \mu\text{T}$, $A = 0.05\ \text{m}^2$ 时,计算ϕ

例 10.2 一块磁性材料的磁通密度为 2.3 T,面积是 0.38 in.^2,求通过该材料的磁通。

解:首先将 0.38 in.^2 化成平方米,39.37 in. = 1 m;因此,

$$A = 0.38\ \text{in.}^2[1\ \text{m}^2/(39.37\ \text{in.})^2] = 245 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$$

通过该材料的磁通是:

$$\phi = BA = (2.3\ \text{T})(245 \times 10^{-6}\ \text{m}^2) = \mathbf{564\ \mu Wb}$$

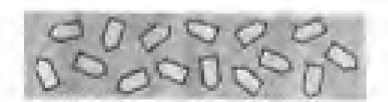
练习:当 $A = 0.05\ \text{in.}^2$, $\phi = 1000\ \mu\text{Wb}$ 时,计算 B。

高斯 特斯拉是磁通密度的国际单位,不过在厘米-克-秒(CGS, centimeter-gram-second)系统中,还有一个叫做高斯的单位(10^4 高斯 = 1 T)。实际上,用来测量磁通密度的仪器就是高斯表。

10.1.5 材料如何磁化

铁磁材料(如铁、镍和钴)放在磁铁的磁场中便会磁化。我们经常看见永久磁铁吸起回形针、钉子和铁屑。这些现象表明,物体在永久磁铁的磁力作用下磁化(或者说实际变成了磁铁),然后被磁铁吸引。移走磁场后,这些物体会失去磁性。

基于自身的原子结构,铁磁材料有很小的磁元。这些磁元可以看成有南北极的条形磁铁。材料没有放在磁场中时,这些磁元是杂乱无章排序的,如图 10.4(a)所示。材料放在磁场中时,磁元排列整齐,如图 10.4(b)所示。因此,材料就变成了磁铁。

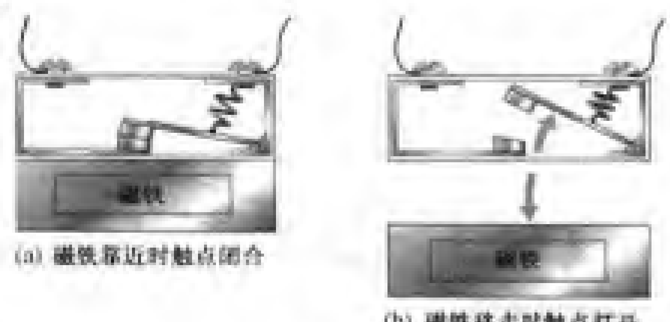


(a) 磁元在未磁化前无规则排列　　(b) 磁元被磁化后有规则排列

图 10.4　磁化前和磁化后的磁元

10.1.6　应用举例

永磁铁有很多用处。这里以正常闭合(NC，normally closed)磁力开关为例。当磁铁靠近开关磁场时，如图 10.5(a)所示，金属臂保持正常闭合的位置。当磁铁移走时，弹簧将臂拉起，切断开关，如图 10.5(b)所示。



(a) 磁铁靠近时触点闭合

(b) 磁铁移走时触点打开

图 10.5　NC 磁力开关的操作

这种开关经常用于环形报警系统中，检查是否有物体从门或窗户进入大楼。如图 10.6 所示，磁力开关连到一个普通的发报器上能起保护作用。任何一个开关打开时，发报器启动，并向中央接收装置和警报单元发送信号。

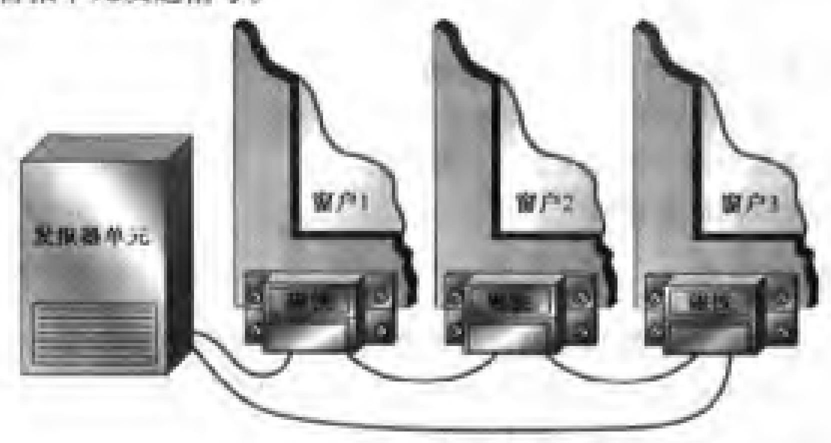


图 10.6　典型环形报警系统的连接

10.1 节练习

1. 两个磁体的北极放在一起时，是相互排斥还是相互吸引？
2. 什么是磁通？
3. $\Phi = 4.5\ \mu\text{Wb}$，$A = 5 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$ 时，求磁通密度。

10.2　电磁场

电磁场是电流在导体中产生的磁场。许多有用的装置都基于电磁场理论，如录音机、电马达、喇叭、电磁线圈和继电器。

学完本节后读者应该能够:

- 解释电磁场的原理
- 判断磁力线方向
- 保持力的定义
- 磁阻的定义
- 磁通势的定义
- 会描述基本的电磁铁

电流产生的磁场称为电磁场,围绕着导体,如图 10.7 所示。看不到的磁力线在导体周围形成一组同心圆,沿着导体的长度方向是连续的。与条形磁铁不同,导线周围的磁场没有南北极。

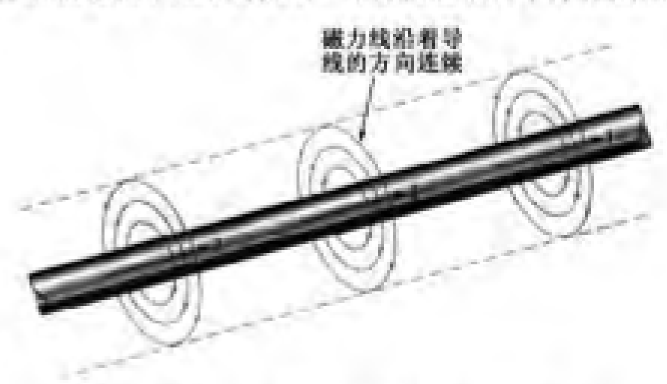


图 10.7 电流通过导体产生的电磁场

尽管看不到磁场,但能看到磁场的作用。例如,一根通电导线垂直穿过一张纸,铺在纸面上的铁屑会自动按照磁力线的形状排成一组同心圆,如图 10.8(a)所示。图 10.8(b)显示了放在电磁场中的指南针的北极将会按照磁力线方向指示。离导线越近,磁场越强;离导线越远则越弱。

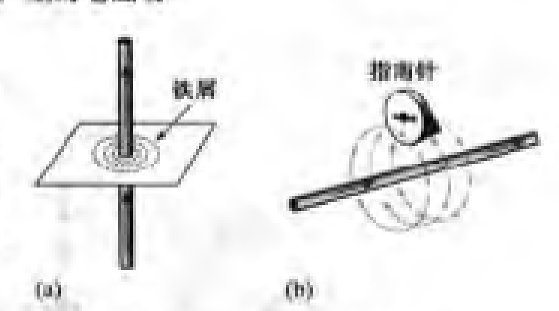


图 10.8 可见的电磁场效果

10.2.1 磁力线的方向

导线周围的磁力线方向如图 10.9 所示。电流方向由左到右时,如图 10.9(a)所示,磁力线是顺时针方向。电流方向由右向左时,如图 10.9(b)所示,磁力线是逆时针方向。

右手定律 记忆磁力线方向的一个方法如图 10.10 所示。设想用右手握住导线,大拇指指向电流方向,四指方向就是磁力线方向。

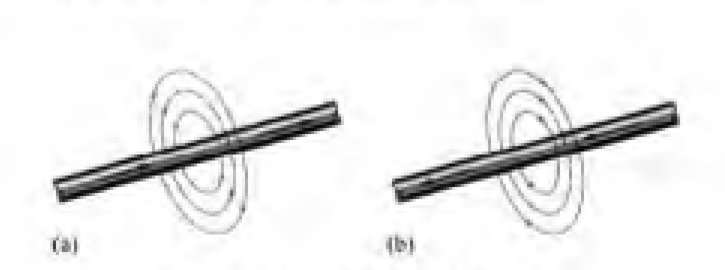


图 10.9 通电导体周围的磁力线

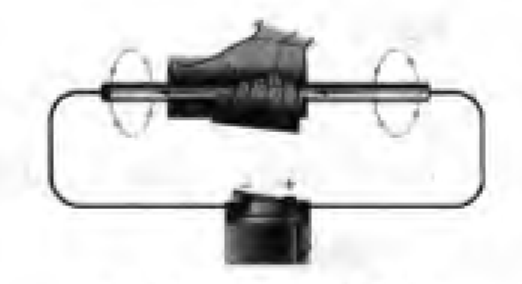


图 10.10 右手定律的图解

10.2.2　电磁场的性质

这里要讨论几个关于电磁场的重要性质。

磁导率(μ)　对一定材料建立磁场的难易程度由材料的磁导率来衡量。磁导率越高，磁场越容易建立。

磁导率的符号是 μ(希腊字母)，对于不同的材料，其值不同。真空磁导率(μ_0)是 $4\pi\times10^{-7}$ Wb/At·m(韦伯/安匝·米)，通常作为参考。铁磁材料的磁导率一般比真空的大几百倍，所以在这些材料中磁场的建立相对容易。铁磁材料包括铁、钢、镍、钴及其合金。

相对磁导率(μ_r)是一种材料的磁导率与真空磁导率的比值。

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{10.2}$$

磁阻($\mathcal{R}$)　在材料中建立磁场的阻力称为磁阻。磁阻值与磁力路径(l)成正比，与磁导率(μ)和横截面积(A)成反比，公式如下：

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \tag{10.3}$$

磁路的磁阻可以同电路的电阻类比。对于磁阻的单位，l 用米，A 用平方米，μ 用 Wb/At·m 来表示。

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{\cancel{m}}{(\text{Wb/At}\cdot\cancel{m})(\cancel{m^2})} = \frac{\text{At}}{\text{Wb}}$$

At/Wb 是安匝/韦伯。

例 10.3　已知长为 0.05 m，横截面积为 0.012 m²，磁导率为 3500 μWb/At·m，求材料的磁阻。

解：

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.05\ \text{m}}{(3500\times10^{-6}\ \text{Wb/At}\cdot\text{m})(0.012\ \text{m}^2)} = \mathbf{1190\ At/Wb}$$

练习：若本例中的 l 加倍，A 减半，磁阻如何变化？

磁通势(mmf)　如前所述，电流流过导体产生磁场。产生磁场的力称为磁通势(mmf)。磁通势的单位是安匝(At)，建立在电流流过单回路线圈的基础上。磁通势的公式是：

$$F_m = NI \tag{10.4}$$

F_m 为磁通势，N 是线圈匝数，I 是电流(安培)。

图 10.11 所示为围绕磁性材料的一组载流线圈产生的力建立了通过磁路的磁通线。磁通量的大小取决于磁通势的值以及材料磁阻的值，公式如下：

$$\phi = \frac{F_m}{\mathcal{R}} \tag{10.5}$$

上述方程称为磁路中的欧姆定律，因为磁通(ϕ)类比于电流，磁通势(F_m)类比于电压，磁阻($\mathcal{R}$)类比于电阻。

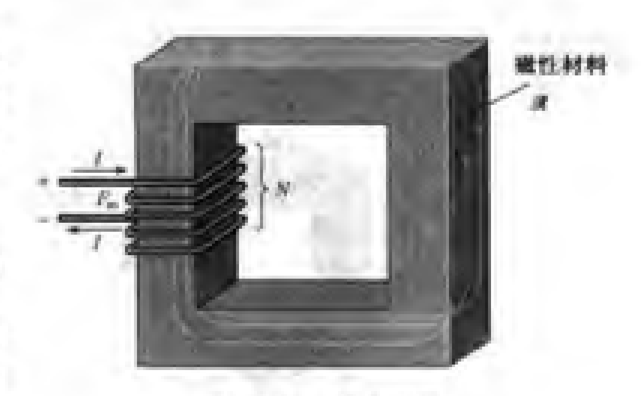


图 10.11　基本磁路

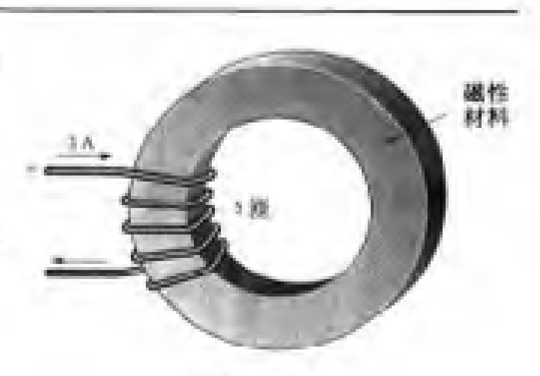


图 10.12

例 10.4 材料磁阻为 28×10^3 At/Wb，求图 10.12 所示磁路中的磁通是多少？

解：

$$\phi=\frac{F_m}{\Re}=\frac{NI}{\Re}=\frac{(5\ \text{t})(3\ \text{A})}{28\times10^3\ \text{At/Wb}}=\mathbf{536\ \mu Wb}$$

练习：材料磁阻为 7.5×10^3 At/Wb，匝数是 30，电流是 1.8 A，求图 10.12 所示磁路中的磁通是多少？



例 10.5 5 匝线圈中通有 2 安培电流。

(a) 磁通势是多少？

(b) 当磁通是 250 μWb 时，磁阻是多少？

解：(a) $N=5$ 并且 $I=2$ A

$$F_m=NI=(5\ \text{t})(2\ \text{A})=\mathbf{10\ At}$$

(b) $$\Re=\frac{F_m}{\phi}=\frac{10\ \text{At}}{250\ \mu\text{Wb}}=\mathbf{40\times10^3\ At/Wb}$$

练习：若例 10.5 中的 $I=850$ mA，$N=50$，磁通是 500 μWb，进行重新计算。

10.2.3 电磁铁

电磁铁基于以上介绍的特性。基本的电磁铁是一个简单的绕在易磁化铁心上的一组线圈。

根据不同的应用，电磁铁可以做成各种形状。例如，图 10.13 所示的 U 形铁心。线圈连到电池上时会产生电流，如图 10.13(a)所示，磁场就建立起来。如果电流反相，如图 10.13(b)所示，磁场方向亦反相。南北两极靠得越近，它们的气隙越小，磁场就越容易建立，因为磁阻变小了。

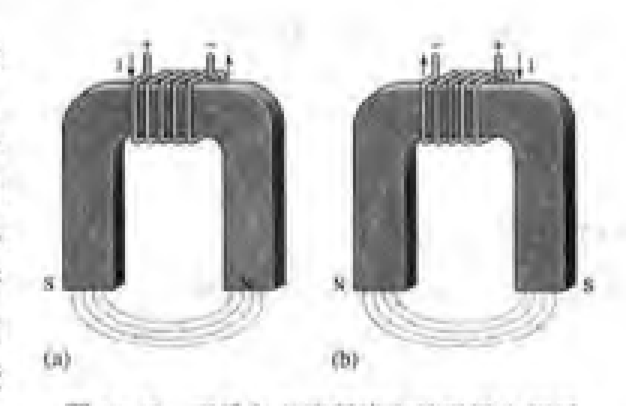


图 10.13 正反向电流所建立的磁场也相反

10.2.4 应用举例

磁盘和磁带读写磁头 简单的磁盘和磁带读写磁头的工作原理图参见图 10.14。写磁头运动时磁体的表面部分磁化，数据字节(1 或 0)从而写在上面。线圈电流脉冲的方向决定了磁通线的方向，如图 10.14(a)所示。在写磁头的气隙处，磁力线穿过储存装置的表面。这使表面一点在磁场方向上磁化。磁化点的一极代表了二进制数 1，另一极代表了 0。当表面一点磁化后，只有被反相磁极写过时才会变化。

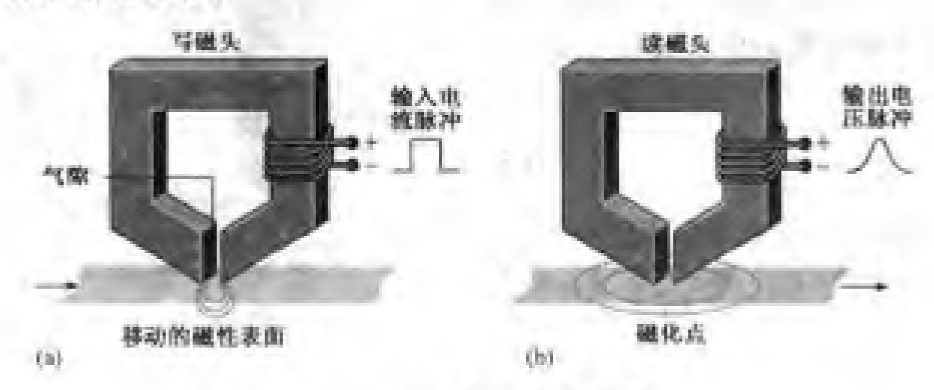


图 10.14 磁性表面的读写功能

磁性表面通过读磁头时，磁化点对读磁头会产生磁场，在线圈中产生电压脉冲。脉冲的极性取决于磁化点的方向，从而判断储存的是 1 还是 0。此过程如图 10.14(b)所示。一般读写头都结合在一起。

磁光盘　磁光盘利用电磁铁和激光束在磁性表面上读写数据。磁光盘和软盘、硬盘一样对磁道和扇区进行格式化。但是激光可以准确地指向一个非常小的点，因此磁光盘可以存储比标准硬盘多得多的数据。

图 10.15(a)显示了磁光盘在记录之前的一块小截面，上面有一块电磁铁。箭头指示小的磁性颗粒磁化成一样的方向。

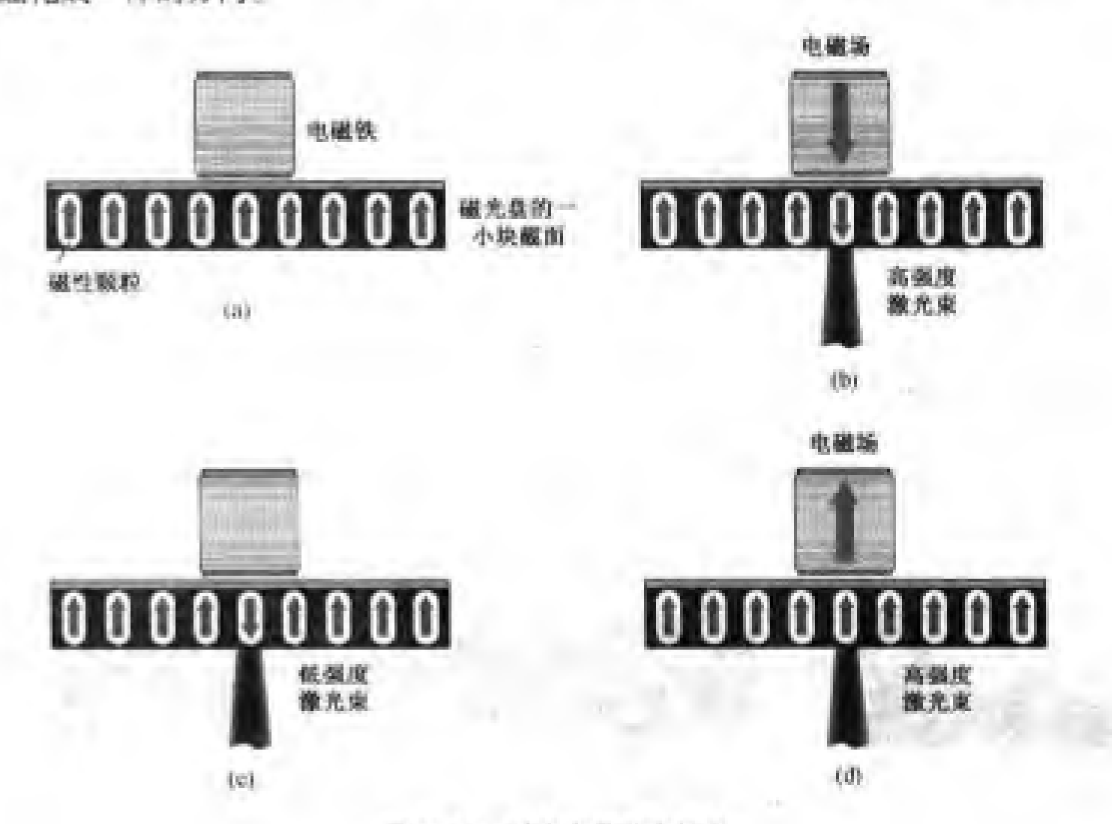


图 10.15　磁光盘的基本概念

利用与磁性颗粒方向相反的外磁场来完成写盘，如图 10.15(b)所示。然后，直接用高强度的激光束灼烧盘上的特定点来存储二进制的 1。盘的材料——磁光合金在室温下有非常高的抗磁化能力。激光灼烧过的点除外，因为其内部磁场方向在电磁场的外加磁场作用下反相了。在储存 0 的点处，未经激光束灼烧，内部向上的磁场没有改变。

如图 10.15(c)所示，读数据时关掉外界磁场，用低强度的激光束照射，便可读取数据。基本上，在二进制 1 的储存点处(反相磁场)反射激光束，偏振改变。但是在 0 的储存处，反射激光的偏振未改变。一个探测器察觉到反射激光极性的不同从而判断所读的是 1 还是 0。

图 10.15(d)所示的是改变外磁场方向和应用高强度激光束使盘上的每一点重新储存原始磁场方向，从而擦去盘中的内容。

10.2 节练习

1. 解释磁场和电磁场的区别。
2. 当线圈中的电流反相时，电磁铁的磁场有什么变化？

3. 叙述磁路中的欧姆定律。
4. 在第3题中,与电路中的对应参数进行比较。

10.3 电磁装置

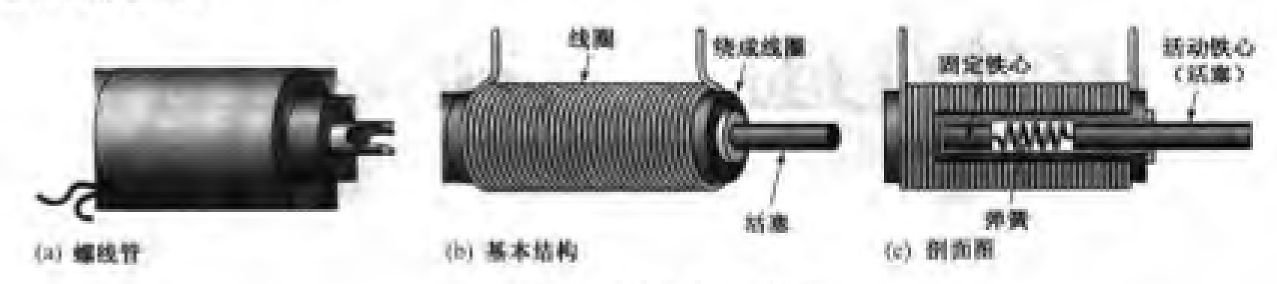
最后一节将介绍一种电磁装置的写磁头。现在,将先了解一些普通的装置。
学完本节后读者应该能够:

- 论述这些电磁装置的工作原理
- 论述螺线管是如何工作的
- 论述继电器是如何工作的
- 论述喇叭是如何工作的
- 论述基本模拟电表的运动

上一节介绍的磁带/盘的读/写头和磁光盘是电磁装置的两个例子,现在讨论其他一些例子。

10.3.1 螺线管

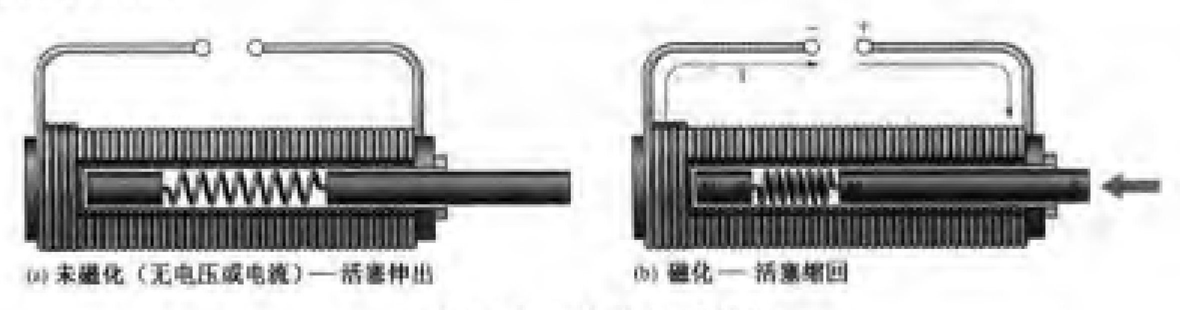
螺线管是一种有活动铁心的电磁装置,活动铁心称为活塞。铁心的运动取决于电磁场和机械弹簧力。图10.16所示为螺线管的基本结构,外部是由导线绕成的线圈,内部是空的圆柱形铁心。有一个固定的铁心和一个活动铁心,活动铁心通过弹簧与固定铁心相连,最后沿轴安装在圆柱形铁心内。



(a) 螺线管　(b) 基本结构　(c) 剖面图

图10.16 螺线管的基本结构

螺线管在通电和不通电情况下的基本操作如图10.17所示。在未通电的情况下,活动铁心伸出。螺线管的线圈中通入电流时,建立的电磁场同时磁化两个铁心。固定铁心的南极吸引活动铁心的北极,将其向里拉,使活动铁心缩回并挤压弹簧。因为线圈中有电流,由于磁场的作用,活动铁心保持缩回状态。切断电流后磁场消失,弹簧力使活动铁心弹出。螺线管应用于开关阀和汽车门锁。



(a) 未磁化(无电压或电流)—活塞伸出　(b) 磁化—活塞缩回

图10.17 螺线管的基本操作

10.3.2 继电器

继电器和螺线管不同，因为电磁场的作用与其说是产生机械运动，不如说是使开关电气接触。图 10.18 所示为有一个常开触点和常闭触点（单极双向）衔铁型继电器的基本操作过程。没有线圈电流时，由于弹簧的作用，衔铁合上使上面的触点闭合，从而使 1 端和 2 端连通，如图 10.18(a)所示。通人线圈电流时，由于电磁场的引力，衔铁向下使下面的触点接通，从而使 1 端和 3 端连通，如图 10.18(b)所示。图 10.18(c)所示为一个典型的继电器，图 10.18(d)所示为其示意符号。

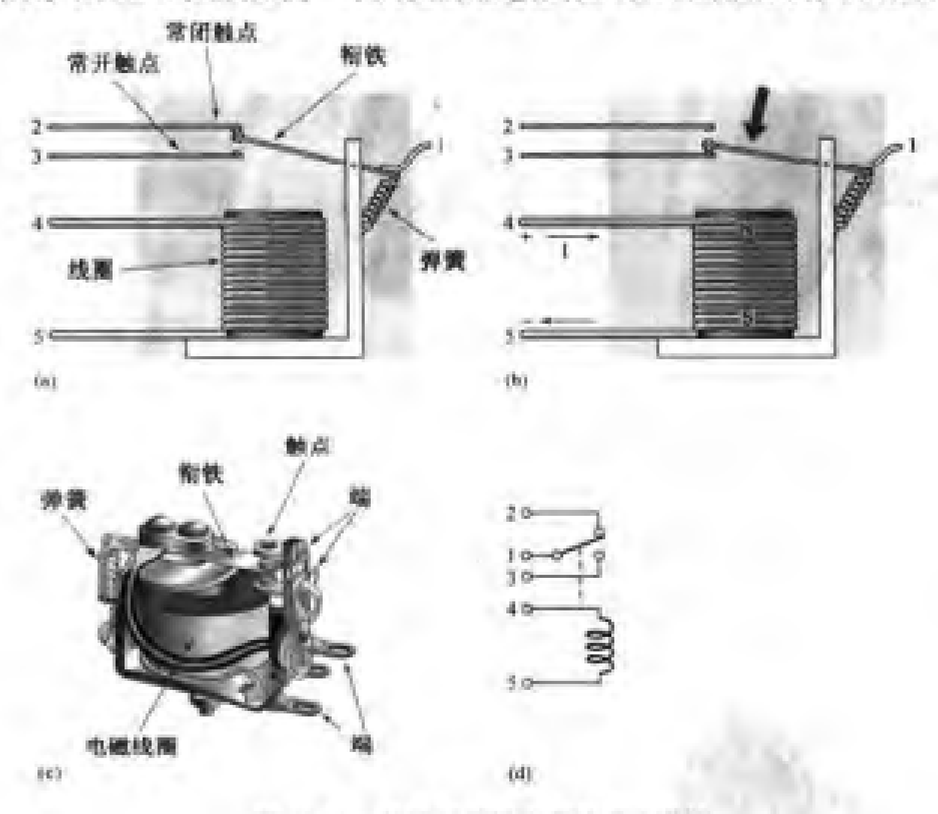


图 10.18　单极双向继电器的基本结构

另一种广泛应用的继电器是簧片继电器，如图 10.19 所示。簧片继电器和衔铁继电器一样应用电磁线圈。触点是用磁性材料制成的薄簧片，放在电磁线圈中。没有线圈电流时，簧片保持开启状态，如图 10.19(b)所示。有电流流过线圈时，由于磁化的作用两簧片接触，如图 10.19(c)所示。

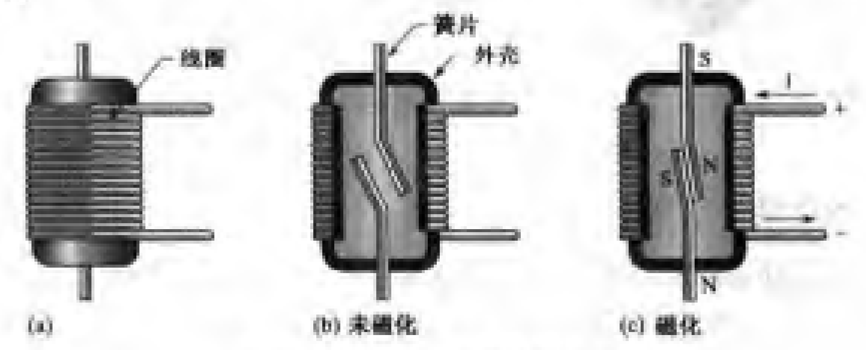


图 10.19　簧片继电器的基本结构

簧片继电器比衔铁继电器更优越，因为其性能更快更可靠，并且产生较少的电弧。但其电流负载能力较衔铁继电器小，并且易于受到机械冲击。

10.3.3 喇叭

永磁铁喇叭在立体声系统、收音机和电视中很常见,其操作都是基于电磁场理论的。一个典型的喇叭由永磁铁和电磁铁组成,如图 10.20(a)所示。喇叭的锥形由一个类似于纸的膜组成,连在由线圈绕成的中空圆柱形上,组成了一个电磁铁。永磁铁的一极放在圆柱线圈中。有电流以一个方向通过线圈时,永磁铁和电磁铁的互感使圆柱体右移,如图 10.20(b)所示。当电流以另一个方向流过线圈时,圆柱体向左移,如图 10.20(c)所示。

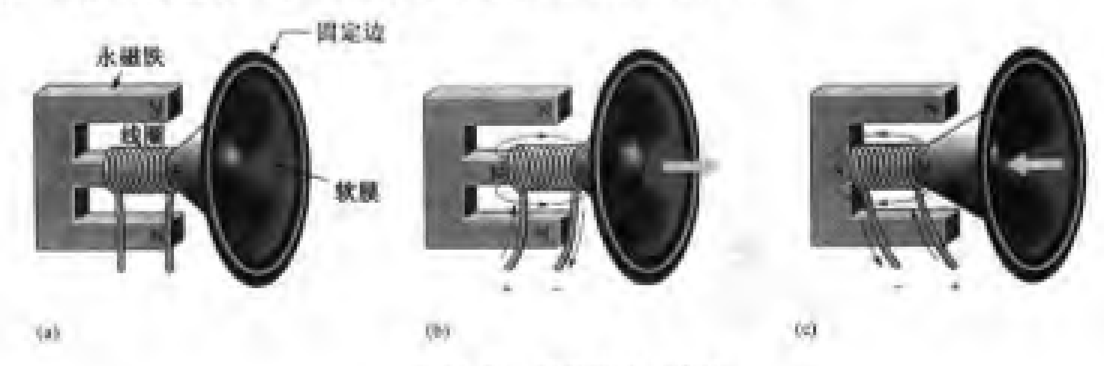


图 10.20 喇叭的基本操作

线圈圆柱体的移动使柔软的膜根据电流的方向里外移动。线圈电流的大小决定了磁场的密度,也决定了膜的移动量。

如图 10.21 所示,当音频信号(声音或音乐)电流流过线圈时,电流的方向和大小发生变化。相应地,膜也会随着信号的改变以不同的幅值和频率振动。膜的振动会使它附近的空气随之相应地振动,这些空气的振动就成为声波。

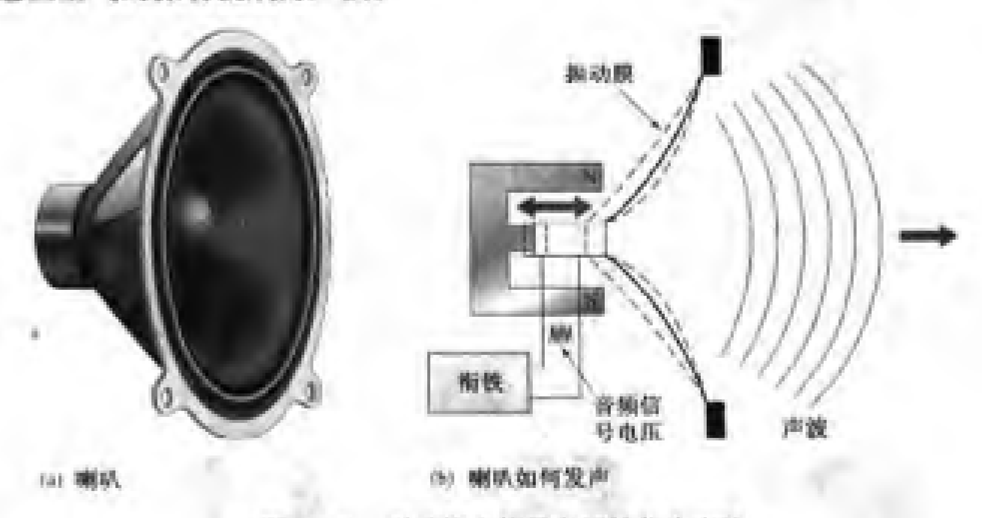


图 10.21 喇叭使声信号电压转化为声波

10.3.4 电表的运动

d'Arsonval 表的运动是模拟万用表中最普通的一种。在这种电表的运动中,指针根据线圈电流的大小按比例偏转。图 10.22 所示为 d'Arsonval 表的基本运动。包括一个绕在具有悬挂轴承装置上的线圈,安在永磁铁的两极之间。指针连在这个可以活动的装置上。线圈中无电流时,由弹簧力保持指针在最左边(零位置)。有电流流过线圈时,电磁力作用于线圈,使其向右转。旋转量取决于电流的大小。

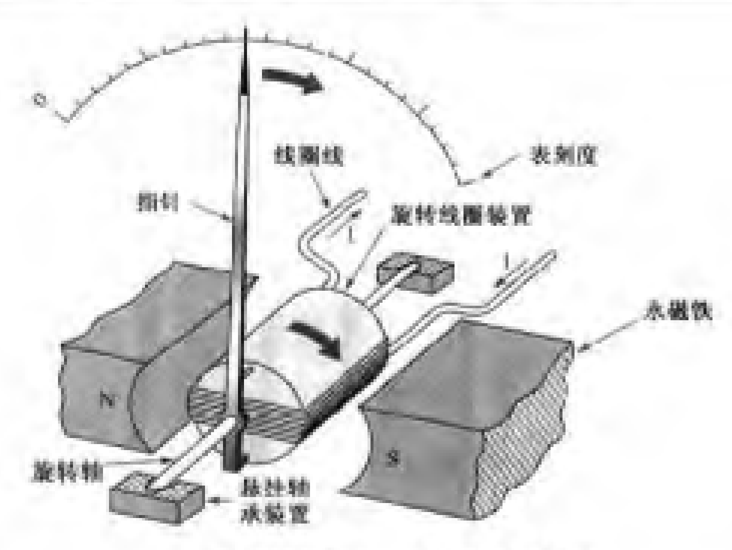


图 10.22　d'Arsonval 表的基本运动

图 10.23 所示为磁场的互感产生了线圈装置的旋转。向内的电流用"叉"表示，向外的电流用"点"表示。向内的电流产生了顺时针的电磁场，使它上面的永磁铁的磁场加强，结果在线圈右边产生了图中所示的向下的力。向外的电流产生了逆时针的电磁场，使它下面的永磁铁的磁场加强，结果在线圈左边产生了图中所示的向上的力。这些力使线圈装置按顺时针方向旋转，与弹簧机械力相反。产生的力和弹簧力在电流值处平衡。撤掉电流时，弹簧力使指针指向零点。

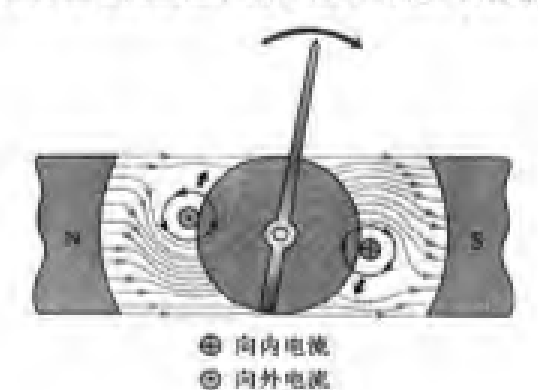


图 10.23

10.3 节练习

1. 解释螺线管和继电器的不同。
2. 螺线管的运动部分叫什么？
3. 继电器的运动部分叫什么？
4. d'Arsonval 表的运动基于哪一个基本原理？

10.4　磁滞

磁场力作用于物质的时候，物质内部的磁通密度会以一种特定的方式发生变化，这就是现在要研究的。

学完本节后读者应该能够：

■ 掌握什么是磁滞

- 描述磁场强度的公式
- 讨论磁力线
- 定义剩磁的概念

10.4.1 磁场强度

物质中的磁场强度定义为：物质每单位长度(l)上的磁势(F_m)。用以下方程描述，磁场强度(H)的单位为每米上的安培匝数(At/m)。

$$H = \frac{F_m}{l} \tag{10.6}$$

其中 $F_m = NI$。注意磁场强度取决于导线线圈的匝数(N)、流过线圈的电流(I)以及物质的长度(l)，而与物质的材料无关。

由于$\phi = F_m/\Re$，因此 F_m 增大时磁通量增大，同时磁场强度(H)增大。回忆一下磁通密度(B)是横截面每单位面积上的磁通量($B = \phi/A$)，所以 B 和 H 也是成比例的。反映 B 和 H 这两个量关系的曲线叫做B-H 曲线或者磁滞曲线。影响 B 和 H 的参数在图 10.24 中举例说明。

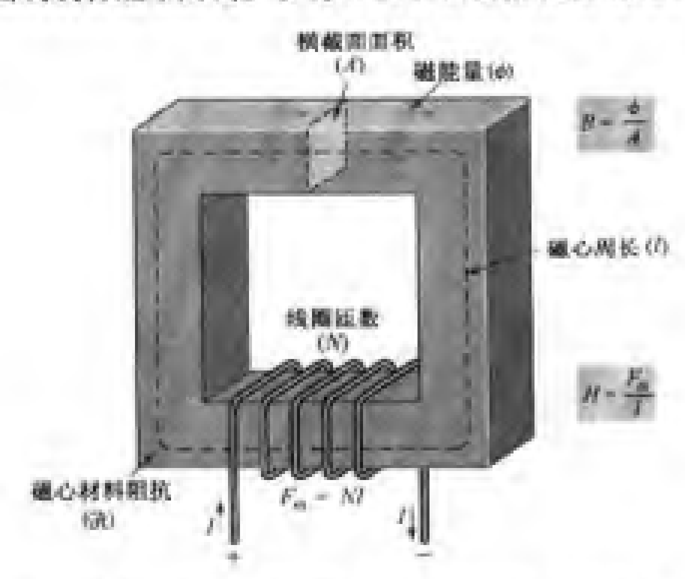


图 10.24 决定磁场强度(H)和磁通密度(B)的关系

10.4.2 磁滞曲线和磁通密度

磁滞是磁性物质的一种特性，也就是说磁化强度的变化滞后于磁场强度的作用。磁场强度(H)随流过导线线圈电流的变化而变化，同时也随着线圈两端电压极性的变化而变化。

图 10.25 描述了磁滞曲线的形成过程。首先，我们假设一个没有磁化的磁核，即 $B = 0$。当磁强度(H)从零开始增长时，磁通密度(B)像图 10.25(a)所示的那样增长。当 H 达到一个特殊值时，B 开始变为缓慢增长。当 H 继续增长达到某值(H_{sat})时，B 达到饱和值(B_{sat})，如图 10.25(b)所示。一旦达到饱和值后，无论 H 如何增长，B 都完全不变。

如图 10.25(c)所示，H 减小到零时，B 将沿一条不同的路径下降到一个剩余值(B_R)。这说明即使磁场强度消失($H = 0$)，材料仍然具有磁性。我们称这种材料始终具有磁性而不表现磁的能力叫做磁滞。材料的磁滞现象表现了在材料最大磁通被磁化到饱和值后仍然可以保持，并且由 B_R 和 B_{sat}来指明。

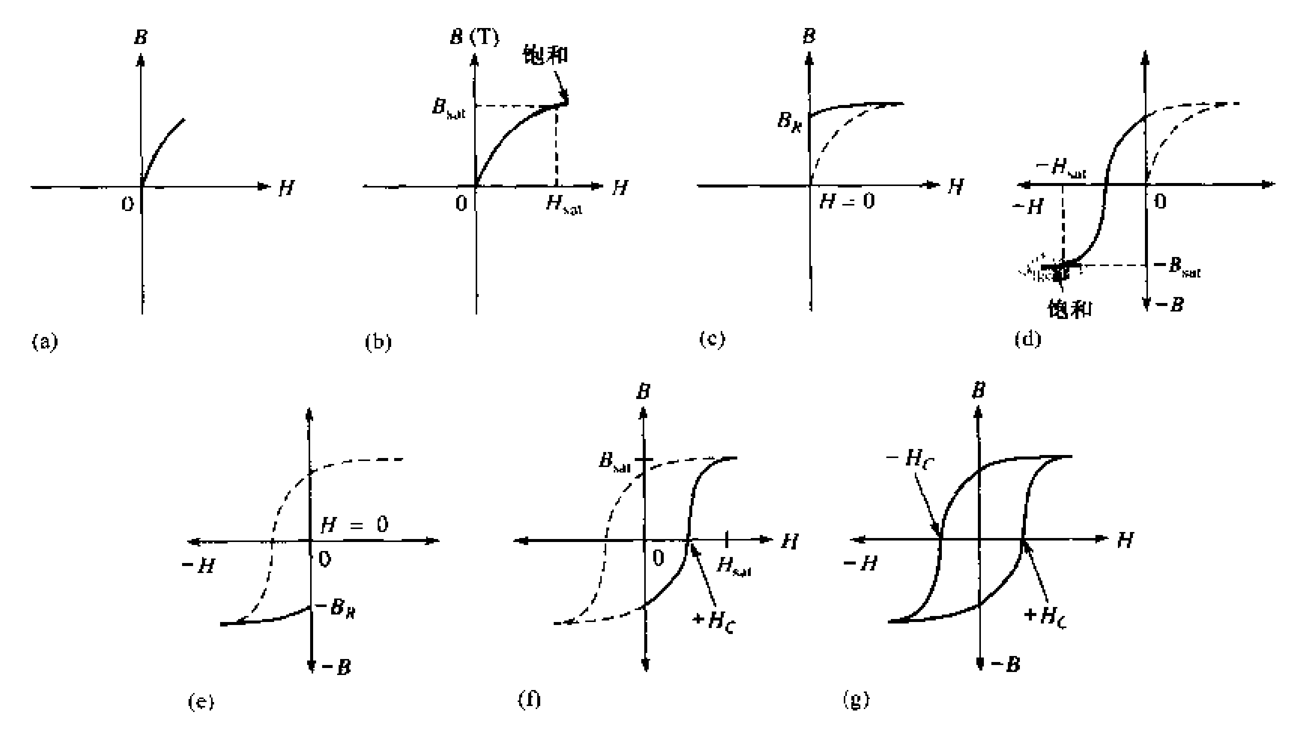


图 10.25　磁滞曲线的形成

磁场强度的反向表现为曲线上 H 的负值，这是由线圈的反方向绕制引起的。H 值沿负方向的增加，使在某一值（$-H_{sat}$）出现饱和，此时磁通密度达到最大负值，如图 10.25(d)所示。

磁力减小到零（$H=0$）时磁通密度达到负的剩余值（$-B_R$），如图 10.25(e)所示，从 $-B_R$ 值开始，当磁力等于 H_{sat}时，磁通密度沿着图 10.25(f)中的曲线加大到最大值。

图 10.25(g)完整显示了 B-H 曲线，又称为磁滞曲线。使磁通密度等于零的磁场强度即为抗磁力 H_C。

具有少量剩磁的磁性材料不能保持一个很好的磁场，而具有很高剩磁的物质会表现出数值 B_R，很接近于 B 的饱和值。如上所述，磁性物质中的剩磁有时有益，有时无益。如在永磁铁和磁带中，大量剩磁是需要的；而在磁带录音机的磁头上，少量剩磁是必要的。在交流发动机中，剩磁是有害的，因为剩余的磁场每次都要克服反向电流，因而浪费能量。

10.4 节练习

1. 对于绕线磁心，线圈上电流的增加如何影响磁通密度？
2. 定义剩磁。
3. 为什么磁带录音机读/写磁头只需要少量的剩磁，而磁带需要大量的剩磁？

10.5　电磁感应

导体运动穿过磁场时，导体两端会产生电压，这个原理就是电磁感应，产生的电压是感应电压。电磁感应的原理对于制作变压器、电子振荡器和许多其他设备是必不可少的。

学完本节以后读者应该能够：

- 掌握电磁感应的原理
- 解释导体在磁场中是如何感应出电压的

- 确定感应电压的极性
- 论述导体在磁场中所受的力
- 陈述法拉第定律
- 陈述楞次定律

10.5.1 相对运动

导线运动穿过磁场时，在导线和磁场之间存在相对运动；磁场运动经过固定的导线时，它们之间同样也存在相对运动。如图 10.26 所示，在任何一种情况下，这种相对运动都会在导线中产生感应电压(v_{ind})，小写的 v 代表瞬时值。

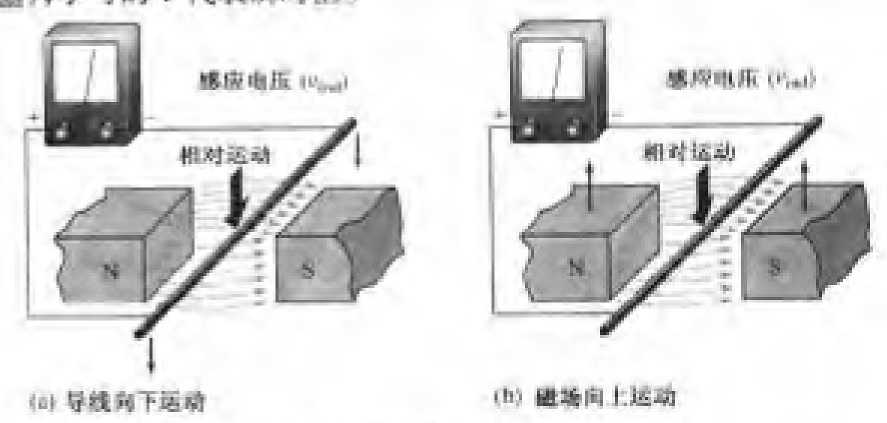


图 10.26 导线和磁场间的相对运动

感应电压(v_{ind})的大小取决于导线或者磁场相对运动的速率。相对速度越快，感应电压也就越大。

10.5.2 感应电压的极性

如果图 10.26 中的导体在磁场中以第一种方式运动，接着再以第二种方式运动，我们将会观察到感应电压的极性发生了翻转。导线向下运动时，感应电压的极性如图 10.27(a)所示；导线向上运动时，感应电压的极性如图 10.27(b)所示。

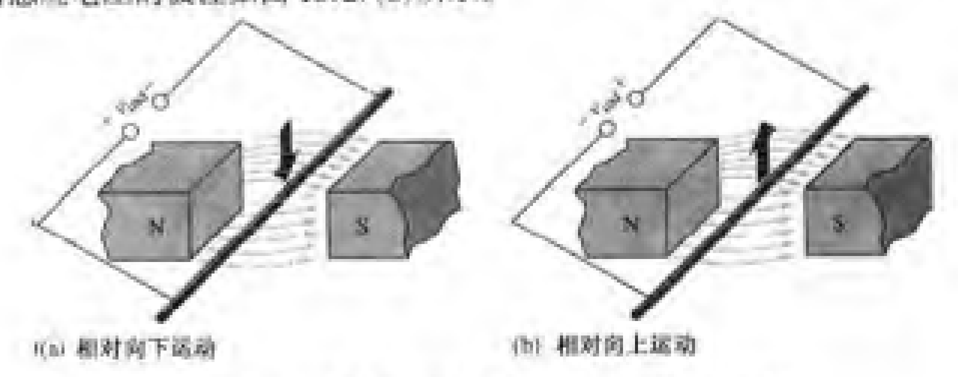


图 10.27 感应电压的极性取决于相对运动的方向

10.5.3 感应电流

如图 10.28 所示，一个负载电阻连接在图 10.27 中的导线上时，磁场中相对运动产生的感应电压将在负载中产生电流，这个电流称为感应电流(i_{ind})。

在磁场中导体的运动产生电压，并在负载中产生电流的作用是电子振荡器的基础。导体存在于运动磁场的概念是电路中发生自感应的基础。

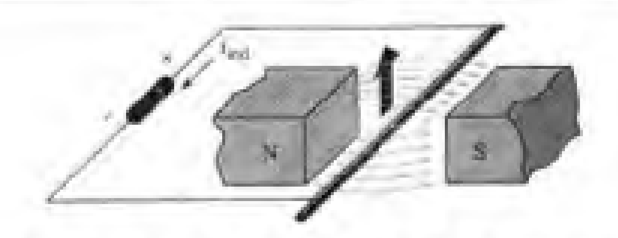


图 10.28 导线运动穿过磁场时负载中的感应电流

10.5.4 磁场中载流导体上的力(马达作用)

如图 10.29(a)所示，磁场中导线上的电流是向外的。电流和永磁场的相互作用建立电磁场；因为永磁场的磁力线和电磁场的磁力线在方向上是相反的，从而，导线上方永磁场的磁力线相对于导线下方永磁场的磁力线趋于变少。因此，导体上方的磁通密度减小，磁场减弱；导体下方的磁通密度增大，磁场增强。结果，导体上产生向上的力，导体趋向于向较弱的磁场方向移动。

如图 10.29(b)所示，电流是向内的，结果导体上产生的力是向下的。这个力是马达的基础。

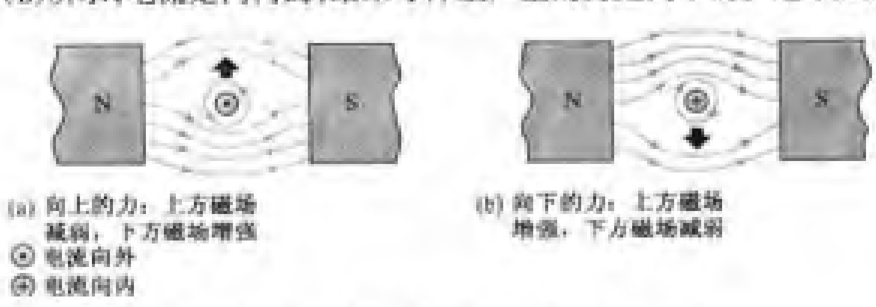


图 10.29 磁场中载流导体上的力(马达作用)

10.5.5 法拉第定律

迈克·法拉第 1831 年发现了电磁感应的原理。他发现在线圈中运动的磁铁在导线上能感应出电压，同时，提供一个完整的回路时感应电压会产生感应电流。正如你所学过的那样，法拉第的两个发现陈述如下：

1. 线圈中感应电压的大小直接与磁场相对于线圈的变化速率($d\phi/dt$)成正比。
2. 线圈中感应电压的大小直接与线圈中导线的匝数(N)成正比。

图 10.30 证实了法拉第的第一个发现。在这里，磁铁棒运动穿过线圈，因此产生了一个变化的磁场。在图 10.30(a)中，磁铁以某个确定的速率运动，不难推测，感应电压也是确定的。在图 10.30(b)中，磁铁以较快的速率运动，产生了一个较大的感应电压。

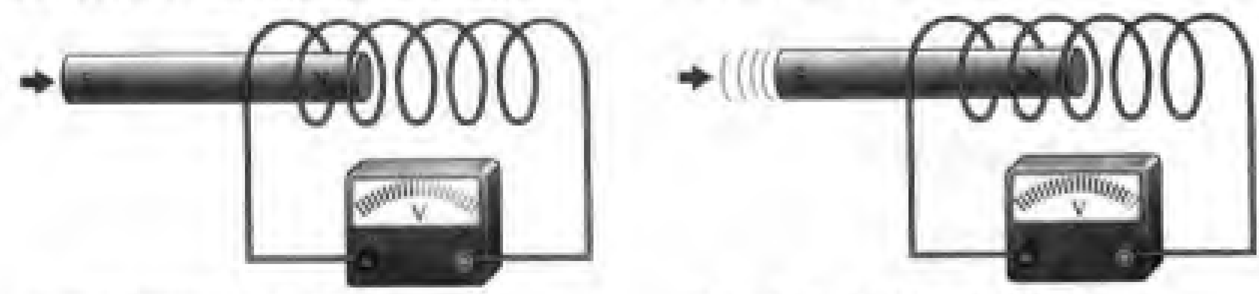
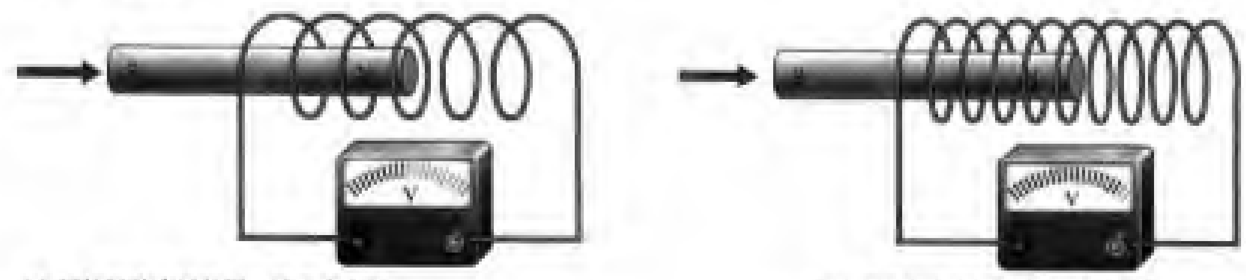


图 10.30 法拉第第一个发现的证明：感应电压的大小直接与磁场相对于线圈的变化速率成正比

图 10.31 证实了法拉第的第二个发现。在图 10.31(a)中，磁铁运动穿过线圈，产生的感应电压如图中所示。在图 10.31(b)中，磁铁以相同的速率运动穿过具有较多匝数的线圈，产生了较大的感应电压。



(a) 磁铁运动穿过线圈，感应出电压

(b) 磁铁以相同的速率穿过匝数更多的线圈，感应出更大的电压

图 10.31 法拉第第二个发现的证明：感应电压的大小直接与线圈中导线的匝数成正比

法拉第定律陈述如下：

导线圈上的感应电压等于线圈匝数倍的磁通量变化率。

法拉第定律的方程式表示为：

$$v_{\text{ind}} = N\left(\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}\right) \tag{10.7}$$

例 10.6 应用法拉第定律计算线圈上的感应电压。在这里线圈的匝数为 100，并且位于变化率为 5 Wb/s 的磁场中。

解：

$$v_{\text{ind}} = N\left(\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}\right) = (100\ \text{t})(5\ \text{Wb/s}) = \mathbf{500\ V}$$

练习：计算变化率为 50 μWb/s 的磁场中匝数为 250 的线圈上产生的感应电压。

10.5.6 楞次定律

法拉第定律陈述变化的磁场在线圈上感应出电压，并且感应电压直接与磁场的变化率及线圈的匝数成正比。楞次定律则定义了感应电压的极性或者方向。

线圈中的电流发生变化时，变化的电磁场作用的结果产生了感应电压，感应电压的极性通常抵制电流的变化。

10.5 节练习

1. 固定磁场中导体上的感应电压是什么？
2. 导体运动穿过磁场的速度增加时，感应电压是增加、减小，还是保持不变？
3. 磁场中的导体中有电流通过时，会发生什么？

10.6 电磁感应的应用

在这一节中，将讨论两种电磁感应的应用——机轴位置自动传感器和直流发生器。尽管还有许多其他方面的应用，但这两者是最有代表性的。

学完本节以后，读者应该能够：

■ 描述电磁感应的一些应用

- 解释机轴位置传感器是如何工作的
- 解释直流发电机是如何工作的

10.6.1　机轴位置自动传感器

一种检测机轴位置的发动机传感器是电磁感应在自动化领域的一项应用。许多汽车中的电子发动机利用机轴位置来定时启动，有时也用来调整燃料控制系统。其基本概念如图 10.32 所示。一个钢轮利用一个延长杆连接在发动机的机轴上。轮盘上的突起部分代表了特定的机轴位置。



图 10.32　突起部分穿过磁铁间的空气层时，机轴位置传感器产生一个电压

钢轮随着机轴旋转时，突起部分周期性地穿越永磁铁的空气层。因为钢铁的磁阻比空气中的少(在钢铁中产生比在空气中产生磁场容易得多)。突起部分通过空气层时，磁通量突然增加，线圈两端产生感应电压。这个过程如图 10.33 所示。电子发动机控制电路利用这个感应电压作为机轴位置的指示器。

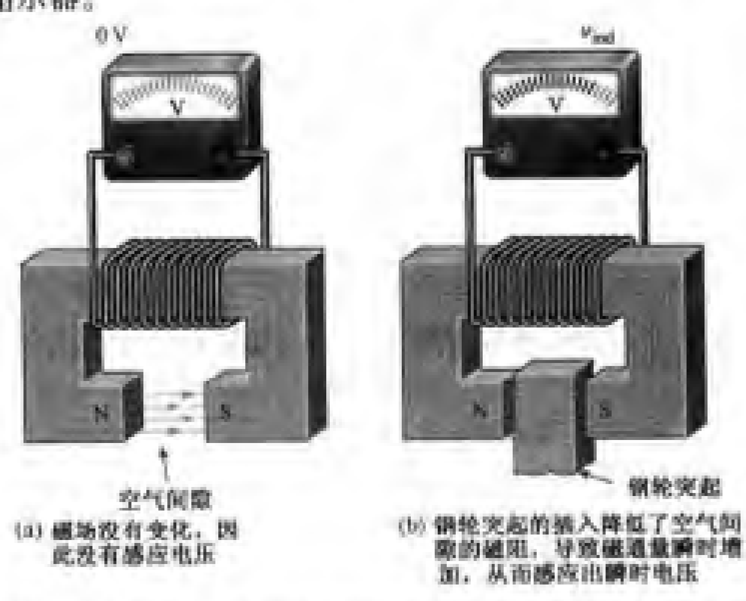


图 10.33　突起穿过磁铁间的空气层时线圈感应到磁场变化，产生感应电压

10.6.2 直流发电机

图 10.34 给出了一个简单的直流发电机，由永磁场中的单个线圈组成。注意，导线圈的首尾两端都连接着一个有开口的环。这个起传导作用的金属环叫做整流器。当导线圈在磁场中旋转时，整流器也跟着旋转。开口小环的每一半都与固定的接触物产生摩擦，上面所说的接触物叫做电刷，它把线圈和外部电路连接在了一起。

如图 10.35 所示，当导线圈在磁场中旋转时，以不同的角度切割磁力线。旋转到位置 A 时，导线圈做平行于磁场的运动。因此，这一时刻导线圈切割磁力线的速率为零；在导线圈从位置 A 运动到位置 B 的过程中，切割磁力线的速率逐渐增大。旋转到位置 B 时，线圈作垂直于磁场运动，因此这一时刻切割最大数量的磁力线。在导线圈从位置 B 运动到位置 C 的过程中切割磁力线的速率逐渐减小，直到位置 C 时达到最小(零)。在导线圈从位置 C 运动到位置 D 的过程中切割磁力线的速率逐渐增大，直到位置 D 时达到最大；然后返回位置 A 到最小值。

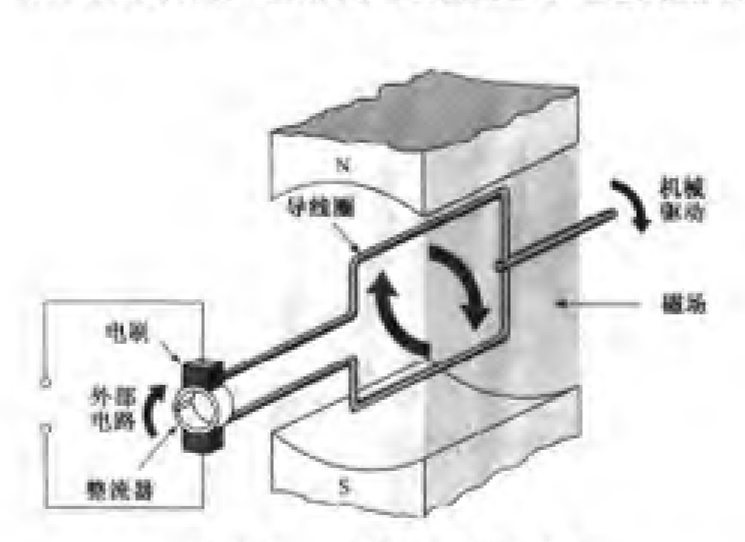



图 10.34 一台简单的直流发电机

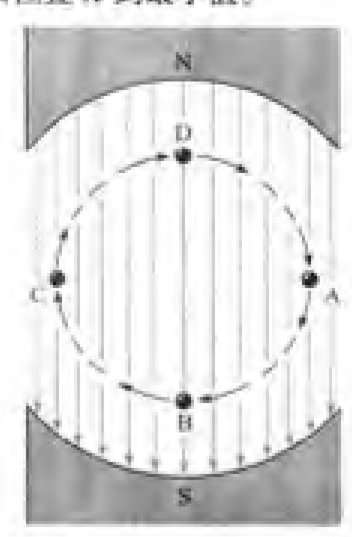


图 10.35 导线圈切割磁场的侧视图

正如所学过的那样，当一根导线运动穿过磁场时产生感应电压；并且根据法拉第定律，感应电压的大小与导线的匝数及其相对于磁场运动的速率成正比。现在又已知导线相对于磁力线运动的角度确定感应电压的大小，因为导线切割磁力线的速率取决于运动的角度。

图 10.36 显示了单独的线圈在磁场中旋转时，在外部电路中感应电压是如何产生的。假定导线圈在瞬时水平位置，于是感应电压为零；如图 10.36(a)所示，在导线圈继续旋转的过程中产生感应电压，并且在位置 B 时达到最大；然后，如图 10.36(b)所示，在导线圈继续从位置 B 旋转到位置 C 的过程中感应电压逐渐减小，并且在位置 C 减小到零。

图 10.36(c)和图 10.36(d)显示了旋转的第二个半周，电刷转换到整流器的相反部分，所以输出上电压的极性保持不变。因此，在导线圈从位置 C 旋转到位置 D，然后回到位置 A 的过程中，电压从位置 C 的零值增加到位置 D 的最大值，然后回到位置 A 的零值。

图 10.37 显示了直流发电机中导线圈在经历几个周期(本例中是三个)的过程中，感应电压是如何变化的。这个电压是直流电压，因为其极性没有改变。然而，电压是在零值和最大值之间脉动的。

增加更多的导线圈时，每个导线圈上的感应电压会在输出上复合。由于电压之间是相互偏移的，因此在同一时刻不会同时达到最大值或者零值。如图 10.38 所示，有两个导线圈时，产生一个平滑的直流电压。使用滤波器(滤波器在第 19 章介绍)能使变化更加平滑，最后得到一个近似恒定的直流电压。

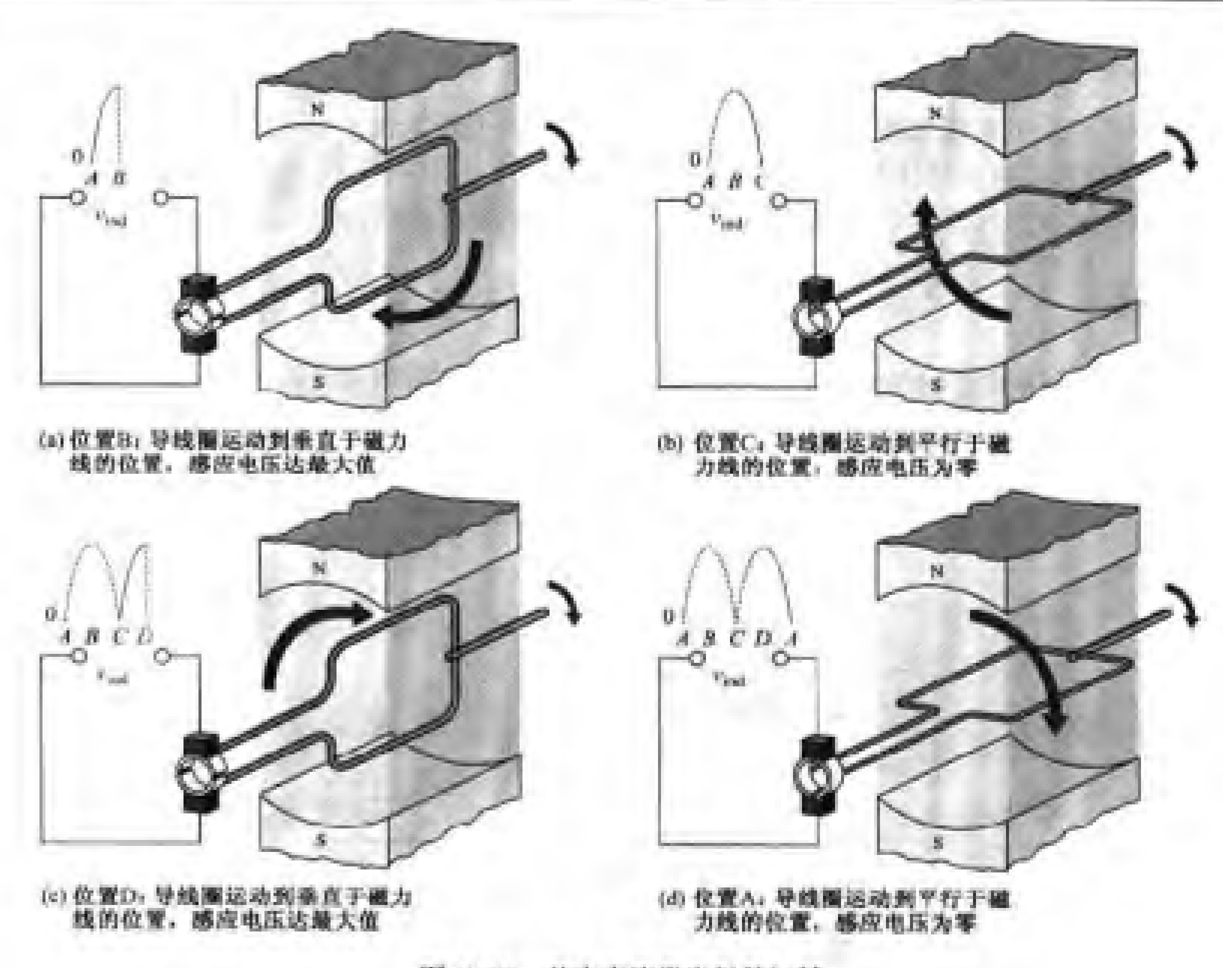


图 10.36　基本直流发电机的运转

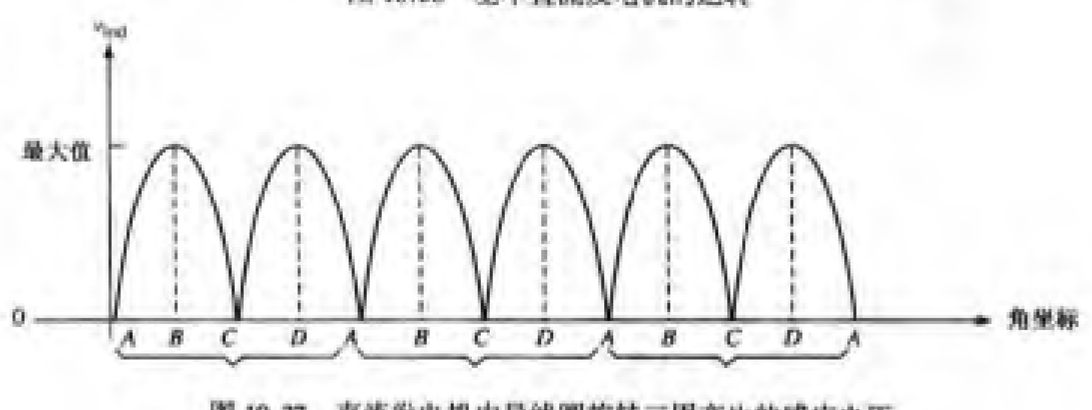


图 10.37　直流发电机中导线圈旋转三周产生的感应电压

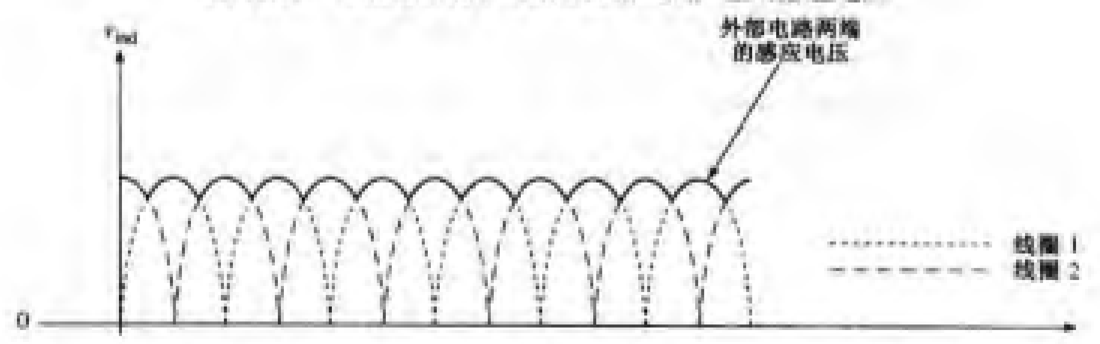


图 10.38　包含两个线圈的发电机的感应电压，感应电压有非常小的变化

10.6 节练习

1. 如果机轴位置传感器中的钢轮停止了,这时有一个轮盘的突起部分在磁铁间的空气层中,则感应电压是什么样的?
2. 如果基本的直流发电机中的导线圈突然以更快的速度旋转,感应电压会发生什么变化?

技术实践

继电器是一种非常常见的电磁设备,用于许多控制领域。用继电器能把较低的电压(比如来自干电池)转换为非常高的电压(比如来自交流插座的 110 V 电压)。接下来可以看到继电器是如何应用于防盗报警系统的。

图 10.39 显示了一个简单的闯入报警系统,用一个继电器打开音响和灯光报警(报警器)。这个系统的工作依靠一个 9 V 的干电池,因此即使房子的供电系统切断了,报警器仍然可以工作。

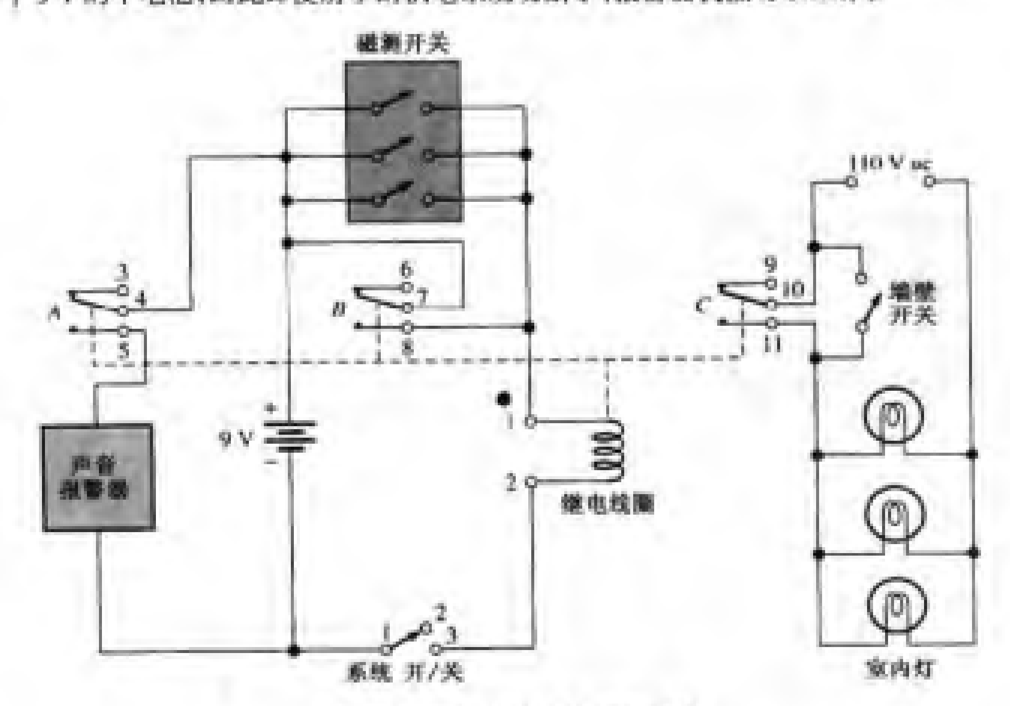


图 10.39 简单的防盗报警系统

检测开关和磁开关通常是开着(NO)的,并联在一起并放置在窗户和门中。继电器是三刀双掷设备,依靠 9 V 的直流线圈电压工作,并输出约 50 mA 的电流。闯入发生时其中一个开关关闭,干电池上的电流到达继电器线圈。线圈给继电器供给能量,同时使三套通常开着的接点闭合。接点 *A* 的闭合使报警器从干电池获得 2 A 电流,报警器打开;接点 *C* 的闭合打开房子的灯光电路;接点 *B* 的闭合锁死继电器,这样即使闯人者关闭其进入的门或者窗户,继电器仍持续供给能量。如果接点 *B* 没有和检测开关并联,只要闯入者背后的窗户或者门关闭了,报警器和灯光也将关闭。

继电器的接点不像图示的那样距离线圈很远,这种画法是为了便于说明其功能。如图 10.40 所示,整个继电器封装在外壳内,同时也显示了继电器的管角图及其内部图。

系统互连

- 画出一个连接方块图,并且在图 10.41 所示的元件间用导线实现连接,以建立图 10.39 所示的报警系统。元件上的连接点用字母表示。

测试过程

- 制订出一个详细的步骤来检查已经用导线连接完的防盗报警系统。

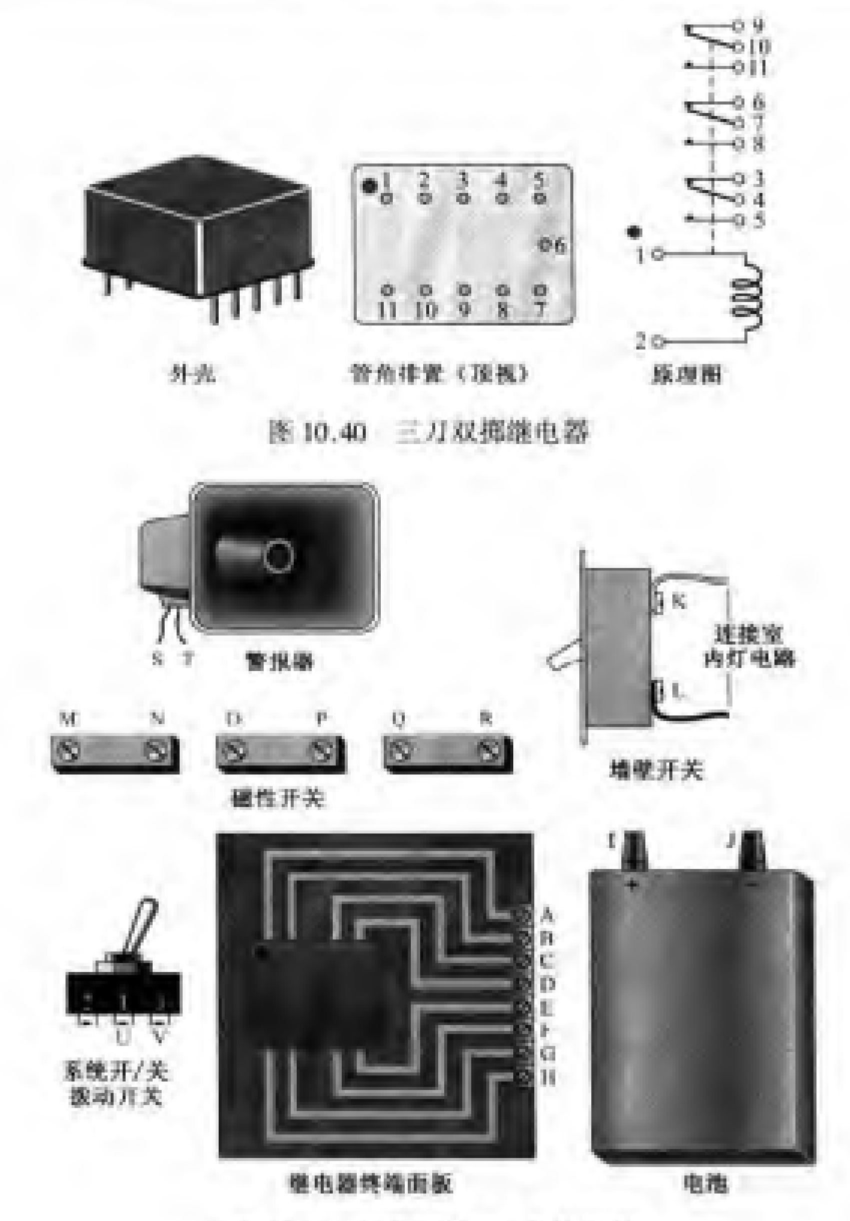


图10.40 三刀双掷继电器

图10.41 防盗报警器元器件阵列

技术实践练习

1. 检测开关的目的是什么？
2. 图10.39中继电器 *B* 部分的目的是什么？

小结

- 不同磁极相互吸引，相同磁极相互排斥。
- 能被磁化的物质称为磁体。
- 当有电流流过导体时，导体周围就产生电磁场。
- 可以用右手定律判定导体周围电磁力线的方向。
- 电磁铁基本上是一个绕着线圈的磁心。
- 当导体运动进入磁场时，或者当磁场相对于导体运动时，导体上就会产生感应电压。
- 导体和磁场间的相对运动越快，感应电压越大。
- 表10.1总结了和磁性有关的量及其单位。

表 10.1

符号	量	单位
B	磁通密度	特斯拉(T)
ϕ	磁通量	韦伯(Wb)
μ	磁导率	韦伯/安培匝数·米(Wb/At·m)
$\mathfrak{R}$	磁阻	At/Wb
F_m	磁通势(mmf)	安培匝数(At)
H	磁场强度	At/m

主要术语

安培匝数(At):磁通势(mmf)的单位。

电磁场:导体中电流产生的,围绕导体的一组磁力线所形成的一种构造。

电磁感应:导体和磁场或者电磁场之间有相对运动时,导体上产生感应电压的现象或者过程。

法拉第定律:导线圈上的感应电压等于线圈匝数倍的磁通量变化率。

高斯:通量密度的厘米-克-秒制单位。

磁滞:磁性物质的一种特性,指磁化强度的变化滞后于磁场力的作用。

感应电流(i_{ind}):导体运动穿过磁场时,导体上感应产生的电流。

感应电压(v_{ind}):磁场变化导致产生的电压。

楞次定律:流过线圈的电流发生改变时,磁场变化产生的感应电压的极性通常抵制电流引起的变化,使电流不能瞬时改变。

磁力线:磁场中从北极到南极辐射的磁通线。

磁场:从磁铁的北极到南极辐射的力线。

磁通量:永磁铁或者电磁铁的北极和南极之间的力线。

磁通势(mmf):产生磁场的力。

磁导率:磁场在物质中建立的难易程度的衡量。

继电器:一种由起磁电流控制电子接点开或者关的电磁控制机械装置。

磁阻:物质中磁场建立的阻碍。

剩磁:物质一旦磁化,在不存在磁场强度以后保持磁化状态的能力。

螺线管:一种由起磁电流控制轴或者活塞机械运动的电磁控制装置。

喇叭:一种把电信号转化为声波的电磁装置。

韦伯(Wb):磁通量的国际单位制单位。

公式

10.1 $B = \dfrac{\phi}{A}$ 磁通密度

10.2 $\mu_r = \dfrac{\mu}{\mu_0}$ 相对磁导率

10.3 $\mathfrak{R} = \dfrac{l}{\mu A}$ 磁阻

10.4 $F_m = NI$ 磁通势

10.5 $\phi = \dfrac{F_m}{\mathfrak{R}}$ 磁通量

10.6　$H = \frac{F_m}{l}$　　磁场强度

10.7　$v_{ind} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$　　法拉第定律

自测题

1. 两个条形磁铁的南极放置很近时，会出现____：
   (a) 吸引力　　(b) 排斥力
   (c) 向上的力　　(d) 没有力
2. 磁场由____组成：
   (a) 正电荷和负电荷　　(b)磁畴
   (c) 通量线　　(d)磁极
3. 磁场的方向是从____：
   (a) 北极到南极　　(b)南极到北极
   (c) 磁铁的内部到外部　　(d)前到后
4. 磁路中的磁阻类似于____：
   (a) 电路中的电压　　(b) 电路中的电流
   (c) 电路中的功率　　(d) 电路中的电阻
5. 磁通量的单位是____：
   (a) 特斯拉　(b) 韦伯　(c) 安培匝数　(d) 安培匝数/韦伯
6. 磁通势的单位是____：
   (a) 特斯拉　(b) 韦伯　(c) 安培匝数　(d) 安培匝数/韦伯
7. 通量密度的单位是____：
   (a) 特斯拉　(b) 韦伯　(c) 安培匝数　(d) 电子伏
8. 活动轴的电磁作用是____的基础：
   (a) 继电器　(b) 断路器　(c) 磁开关　(d) 螺线管
9. 当有电流流过放置在磁场中的导线时，____：
   (a) 导线将过热　　(b) 导线将磁化
   (c) 导线上受到一个力　　(d) 磁场将消失
10. 一个导线圈放置在变化的磁场中，如果线圈的匝数增加，线圈上的感应电压将____：
    (a) 保持不变　(b) 减小　(c) 增加　(d) 超额
11. 如果导体在恒定的磁场中以恒定的速率前后往复运动，导体上的感应电压将____：
    (a) 保持恒定　(b) 改变极性　(c) 减小　(d) 增加
12. 在图 10.32 中的机轴位置传感器中，线圈上的感应电压由____引起：
    (a) 线圈中的电流　　(b) 钢轮的旋转
    (c) 突起穿过磁场　　(d) 钢轮旋转速度增加

习题(较难的题目标有星号，奇数习题的答案在本书的末尾)

10.1 节　磁场

1. 磁场的横截面面积增加，但通量保持不变，那么通量密度是增加还是减小？
2. 在某个磁场中，横截面面积是 0.5 m^2，通量是 1500 μWb，那么通量密度是多少？
3. 通量密度是 2500×10^{-6} T，横截面面积是 150 cm^2 时，磁性物质中的通量是多少？

10.2 节　电磁场

4. 在图 10.8 中，流过导体的电流反向时，罗盘指针会发生什么变化？

5. 绝对磁导率为 750×10^{-6} Wb/At·m 的强磁性物质，其相对磁导率是多少？
6. 如果物质的绝对磁导率为 150×10^{-7} Wb/At·m，长度为 0.28 m，横截面面积为 0.08 m^2，确定该物质的磁阻是多少？
7. 当有 3 A 的电流流过匝数为 50 的线圈时，线圈的磁通势是多少？

10.3 节 电磁装置

8. 一般地，当螺线管起作用时，活塞是伸出还是收回？
9. (a) 当螺线管起作用时，什么力使活塞运动？
   (b) 什么力使活塞回到静止位置？
10. 解答图 10.42 所示电路中，当开关 1(SW1)闭合时，事件发生的顺序。

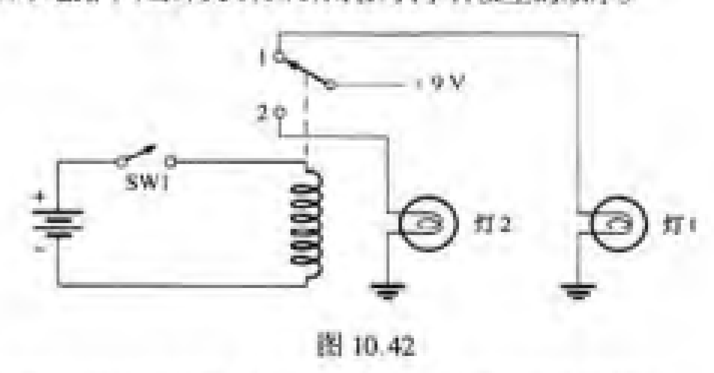


图 10.42

11. 当有电流流过线圈时，什么将导致 d' Arsonval 运动中的指针发生偏斜？

10.4 节 磁滞

12. 如果习题 7 中磁心的长度是 0.2 m，那么磁场强度是多少？
13. 在磁心物理特性没有改变的情况下，怎样能使图 10.43 中的通量密度发生变化？
14. 在图 10.43 中确定下列量：
    (a) H (b) Φ (c) B
15. 从图 10.44 中的磁滞曲线，确定哪种物质有最大的剩磁性？

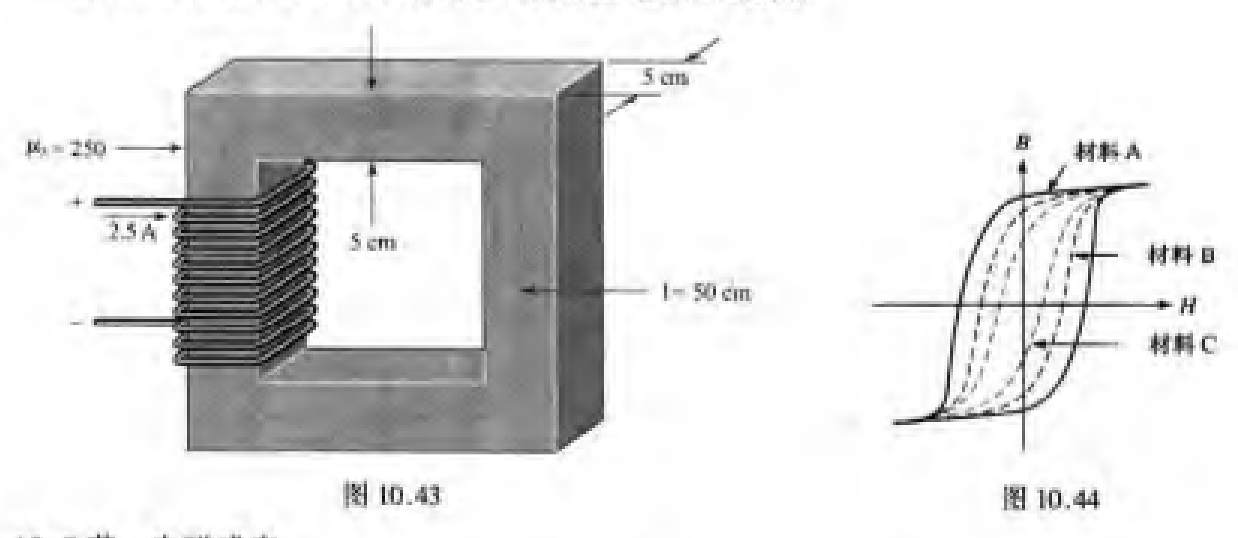


图 10.43　　图 10.44

10.5 节 电磁感应

16. 根据法拉第定律，如果磁通量的变化率加倍，给定线圈上的感应电压会发生什么变化？
17. 某个线圈上的感应电压是 100 mV，线圈的两端连接有 100 Ω 的电阻，那么感应电流是多少？
18. 磁场以 3500×10^{-7} Wb/s 速率变化，那么放置在磁场中匝数为 50 的线圈上的感应电压是多少？
19. 楞次定律是如何对法拉第定律进行补充的？

10.6 节 电磁感应的应用

20. 图 10.32 中,当钢轮未旋转时,为什么没有感应电压?
21. 解答图 10.34 中整流器和刷子的作用。
*22. 一个基本的单线圈直流发电机以 60 rev/s 速率旋转,那么每秒有多少个直流输出电压的波峰(达到最大值)?
*23. 假定另外一个线圈加到习题 22 中的直流发电机中,并且距离第一个线圈 90°,画出电压对时间的曲线图以显示输出电压的波形。使最大电压值为 10 V。

答案

10.1 节 磁场

1. 北极排斥。
2. 磁通量是组成磁场的一组力线。
3. $B=\Phi/A=900\ \mu T$

10.2 节 电磁场

1. 电磁由流过导体的电流产生。只有在有电流的情况下电磁场才存在,磁场不依靠电流而存在。
2. 电流反向时,磁场的方向也翻转。
3. 通量(Φ)等于磁场强度(F_m)除以磁阻($\mathcal{R}$)。
4. 通量:电流,mmf:电压,磁阻:电阻。

10.3 节 电磁装置

1. 螺线管只产生一种运动,而继电器提供一种电子接点闭合。
2. 螺线管的能动部分是活塞。
3. 继电器的能动部分是衔铁。
4. d'Arsonval 运动基于磁场间的相互作用。

10.4 节 磁滞

1. 电流的增加使通量密度增加。
2. 剩磁性指磁场强度消失以后,物质的一种保持磁化的能力。
3. 磁场强度(H)消失以后,磁头不应该再保持磁化;但磁滞应该保持磁化。

10.5 节 电磁感应

1. 感应电压是零。
2. 感应电压增大。
3. 有电流时,有一个力加在导体上。

10.6 节 电磁感应的应用

1. 空气层中的感应电压是零。
2. 较快的旋转增大感应电压。

技术实践

1. 检测开关关闭时,表明从窗户或者门有闯入。
2. 检测到闯入时,B 部分锁存继电器,并使继电器持续供给能量。

实例相关练习

10.1 235 μWb

10.2 31.0 T

10.3 磁阻增加到 4762 At/Wb。

10.4 7.2 mWb

10.5 (a) $F_m = 42.5$ At (b) $\mathscr{R} = 85 \times 10^3$ At/Wb

10.6 12.5 mV

自测题

1.(b) 2.(c) 3.(a) 4.(d) 5.(b) 6.(c)

7.(a) 8.(d) 9.(c) 10.(c) 11.(b) 12.(c)

第 11 章　交流电流和交流电压的介绍

引言

在前一章中，已经讨论了具有直流电流和直流电压的直流电组电路。本章将介绍交流电路分析，在这里，把随时间变化的电信号，特别是正弦波作为研究对象。电信号是随时间以某种确定方式变化的电压或者电流。换句话说，电压或者电流根据某种模式变化，这种模式称为波形。

特别需要强调正弦波，因为在分析交流电路中正弦波是一个基本的波形。其他类型的波形也是要介绍的，包括脉冲波形、三角波形和锯齿波形。还将介绍示波器用于波形的显示和测量的用途。

交流电压指以某个速率变化的电压，而交流电流指以某个速率变化的电流。正弦波是最常见，也是最基本的类型，因为所有其他类型的重复波都可以分解为许多正弦波的复合。正弦波是周期性的波形，在一定的时间间隔内重复。每次重复需要的时间称为周期，重复的速率称为频率。

本章目标

- 识别正弦波并测量其特性
- 描述正弦波是如何产生的
- 确定正弦波的不同电压值和电流值
- 描述正弦波的角度关系
- 用数学方法分析正弦波
- 对电阻电路应用基本的电路定律
- 确定既包含交流成分，又包含直流成分的总电压
- 识别基本的非正弦波形的特性
- 用示波器测量波形

主要术语

- 波形
- 正弦波
- 交流电流
- 循环
- 周期(T)
- 频率(f)
- 赫兹(Hz)
- 振荡器
- 瞬时值
- 峰值
- 峰 - 峰值
- 均方根值
- 平均值
- 度
- 弧度
- 相位
- 振幅(A)
- 脉冲
- 脉冲宽度(t_W)
- 上升时间(t_r)
- 下降时间(t_f)

- 周期性
- 占空因数
- 斜坡
- 基波
- 谐波
- 示波器

技术实践

在这部分中,将用示波器测量 AM 接收机中的电压信号。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料,请访问 http//www.prenhall.com/floyd。

11.1 正弦波

正弦波是交流电流(ac)和交流电压的基本类型,也称为正弦曲线。电力公司提供的电力服务正是采用正弦电压和正弦电流的形式。此外,其他类型的重复波是由许多独立的,称为谐波的正弦波复合而成的。

学完本节以后读者应该能够:

- 识别正弦波并测量其特性
- 确定周期
- 确定频率
- 描述周期和频率的关系

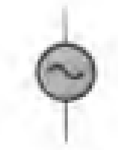


图 11.1 正弦电压源的符号

正弦波或者正弦曲线可以通过两种类型的源产生:交流发电机或者电子振荡电路,在仪器中通常称之为电子信号发生器。图 11.1 所示的符号用来表示正弦电压源。

图 11.2 所示的曲线显示了正弦波的一般形状,既可以是交流电流,也可以是交流电压。纵轴上显示电压(或者电流),横轴上显示时间(t)。注意电压(或者电流)如何随时间变化:从零点开始,电压(或者电流)逐渐增加到正向最大值(波峰);再返回零点;接着逐渐减小到负向最大值(波谷);最后再次返回零点,这样就形成了一个完整周期。

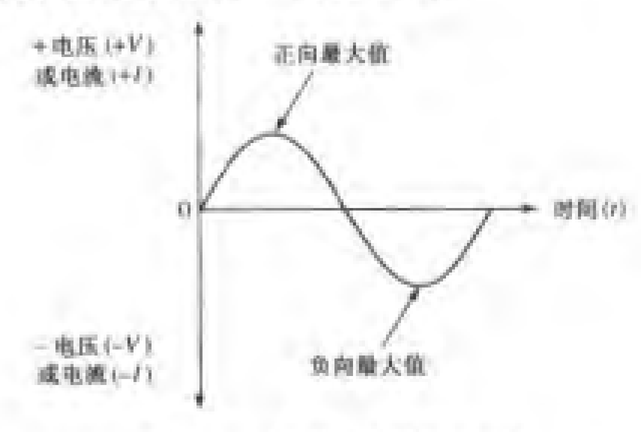


图 11.2 正弦波一个周期的曲线

11.1.1 正弦波的极性

正如所提到的那样,正弦波在零点位置改变极性;也就是说,在正值和负值之间交替。如

图 11.3 所示，一个正弦电压源(V_s)作用于电阻电路时，产生一个交变正弦电流。电压改变极性时，像图中描绘的那样，电流相应地改变方向。

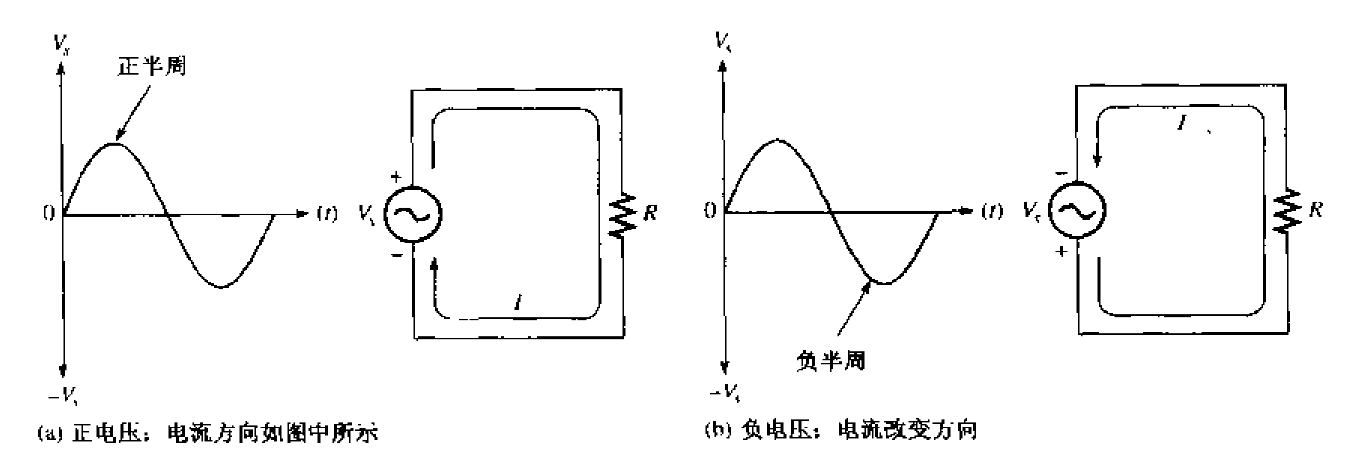


图 11.3　交流电流和交流电压

在电压 V_s 作用的正半周过程中，电流方向如图 11.3(a)所示；在电压 V_s 作用的负半周过程中电流反向，如图 11.3(b)所示。正半周和负半周的结合组成了正弦波的一个周期。

11.1.2　正弦波的周期

正弦波随时间(t)变化的方式可定义为：

正弦波完成一个完整周期所需要的时间称为周期(T)。

图 11.4(a)是一个周期的正弦波。很明显，这个正弦波是周期性的，如图 11.4(b)所示。所有周期内的正弦波都是一致的，因而所有正弦波的周期都是固定值。可以认为每一次穿越零点到下一次对应的穿越是正弦波的周期，如图 11.4(a)所示，这个周期也可以用两个相临的峰值来衡量。

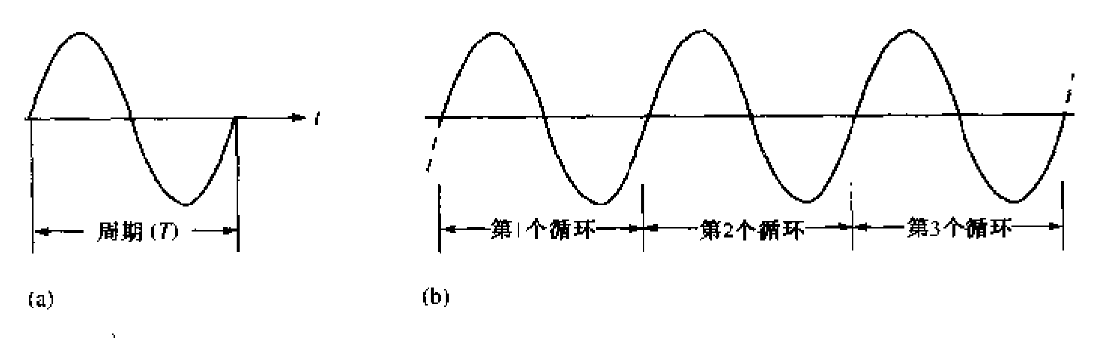


图 11.4　对于每个循环，正弦波的周期都一样

例 11.1　图 11.5 所示正弦波的周期是多少？

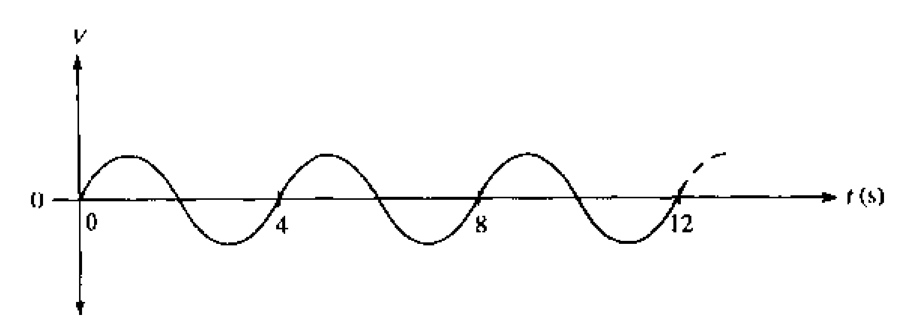


图 11.5

解:如图 11.5 所示,每 4 秒钟完成一个循环,所以这个正弦波的周期是 4 秒。

$$T = 4\ \text{s}$$

练习:如果这个正弦波经过 12 秒完成了 5 次循环,那么它的周期应为多少?

例 11.2 在图 11.6 中用三种方法测量图中所示正弦波的周期。

解:**方法 1**:可以通过两个对应零点的距离来衡量(两个对应零点的斜率相同)。

方法 2:可以用两个相邻循环的波峰之间的距离来衡量。

方法 3:可以用两个相邻循环的波谷之间的距离来衡量。

这些测量方法如图 11.7 所示,图中有两个周期。但要注意,无论选择什么样的点,必须有相同的纵坐标。

练习:如果一个波峰出现在 1 ms 的位置,而第二个波峰出现在 2.5 ms 的位置,则这个正弦波的周期是多少?

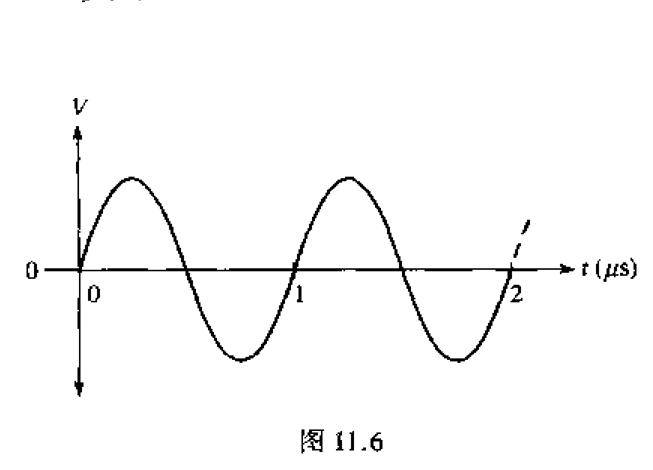


图 11.6

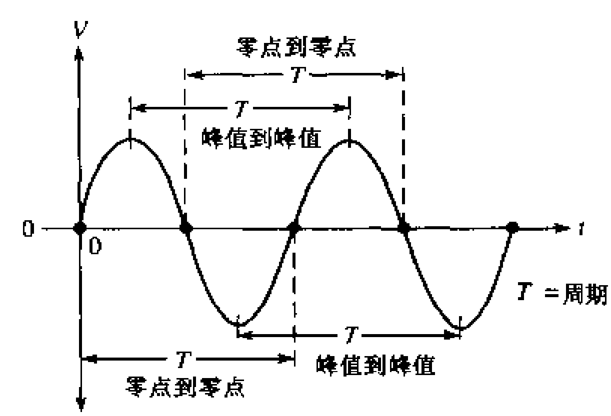
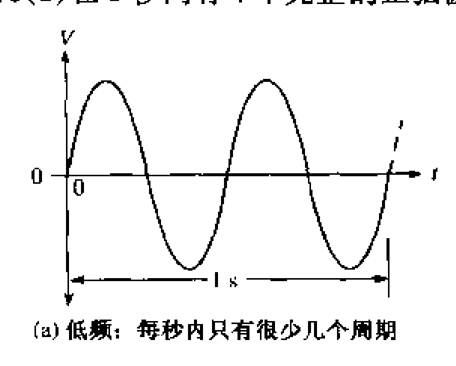


图 11.7 正弦波周期的测量

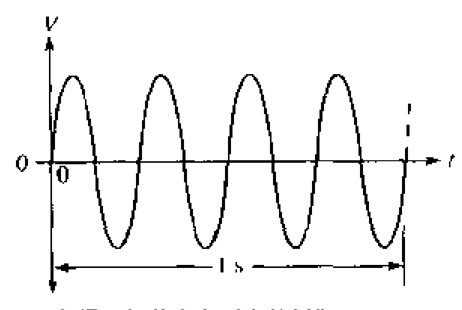
11.1.3 正弦波的频率

频率是 1 秒内所包含的正弦波的周期数。

包含周期越多,频率越高,频率的单位是赫兹(Hz)。1 Hz 等于每秒 1 周期,60 Hz 等于每秒 60 周期,依次类推。图 11.8 显示了两个正弦波,其中图 11.8(a)在 1 秒内有 2 个完整的正弦波周期,图 11.8(b)在 1 秒内有 4 个完整的正弦波周期。因此,后者所示正弦波的频率是前者的两倍。



(a) 低频:每秒内只有很少几个周期



(b) 高频:每秒内有更多的周期

图 11.8 频率的说明

11.1.4 周期和频率的关系

周期(f)和频率(T)的关系公式如下:

$$f = \frac{1}{T} \tag{11.1}$$

$$T = \frac{1}{f} \tag{11.2}$$

f 和 T 之间是反比关系，知道其中一个，可以用计算器上相应的[键图][键图]键来计算另一个的值。二者之间这种相反的关系给人一种感觉，周期大的正弦波在 1 秒内循环的次数小于周期小的正弦波。

例 11.3　在图 11.9 中哪个正弦波的频率更高？周期和频率由波形决定。

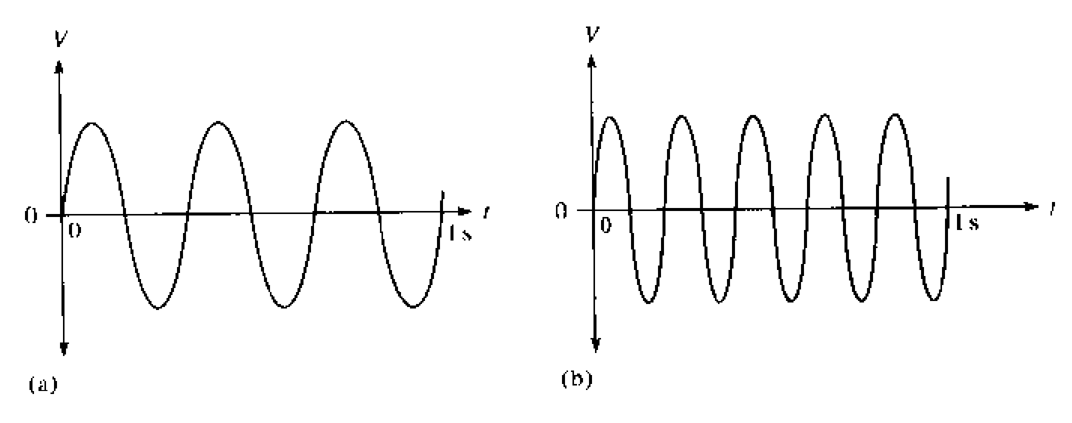


图 11.9

解：图 11.9(b)中的正弦波频率更高，因为在 1 秒内完成的周期数比图 11.9(a)中的更多。

在图 11.9(a)中，1 秒中有 3 个循环。因此，每个循环耗时 0.333 秒（三分之一秒），这就是周期。

$$T = 0.333\ \text{s} = \mathbf{333\ ms}$$

频率是：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{333\ \text{ms}} = \mathbf{3\ Hz}$$

在图 11.9(b)中，1 秒中有 5 个循环。因此，每个循环耗时 0.2 秒（五分之一秒），这就是周期。

$$T = 0.2\ \text{s} = \mathbf{200\ ms}$$

频率是：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{200\ \text{ms}} = \mathbf{5\ Hz}$$

练习：如果给出的波形相邻的波峰经历 50 μs，频率是多少？

例 11.4　一个正弦波的周期是 10 ms，则频率是多少？

解：用式(11.1)：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10\ \text{ms}} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}\ \text{s}} = \mathbf{100\ Hz}$$

练习：一个正弦波在 20 ms 内有 4 个循环，则频率是多少？

例 11.5　一个正弦波的频率是 60 Hz，周期是多少？

解：用式(11.2)：

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60\ \text{Hz}} = \mathbf{16.7\ ms}$$

练习：如果 $T = 15\ \mu s$，频率是多少？

11.1 节练习

1. 描述正弦波的一个周期。
2. 在什么情况下，正弦波改变极性？
3. 正弦波在一个周期内有多少最高点？

4. 如何测量正弦波的周期?
5. 定义频率并说明其单位。
6. 若 $T = 5\ \mu s$,确定频率。
7. 若 $f = 120\ Hz$,确定周期。

11.2 正弦电压源

产生正弦电压的两个基本方法是电磁场和电子学,正弦波是通过交流发电机和电子振荡器产生的。

学完本节以后读者应该能够:

- 描述正弦波是如何产生的
- 论述交流发生器的基本工作方法
- 论述影响交流发生器频率的因素
- 论述影响交流发电机电压的因素

11.2.1 交流发生器

图 11.10 给出一台放大的简易交流发生器,在两块永磁铁之间放置一根环型的导线。注意,环型导线的每一端都与独立的固定滑动小圈相连。当环型导线在南北极所夹的电磁场中旋转时,滑动小圈同时旋转,并且和连接外部电路的刷子相摩擦。对比图 10.34 中的交流发生器和直流发生器,然后找出刷子和电圈安置的不同之处。

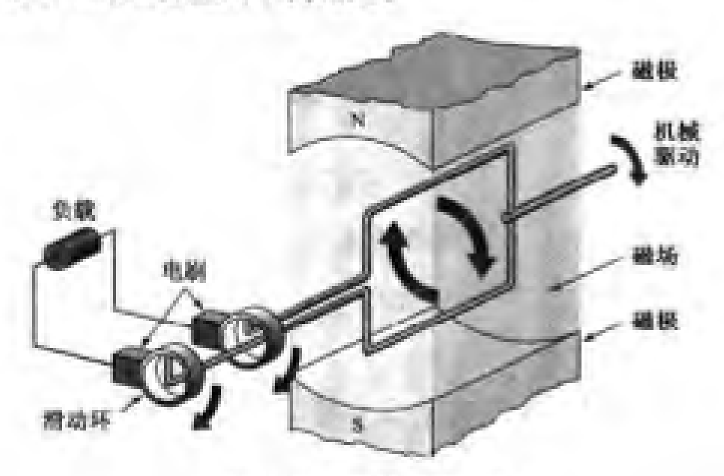


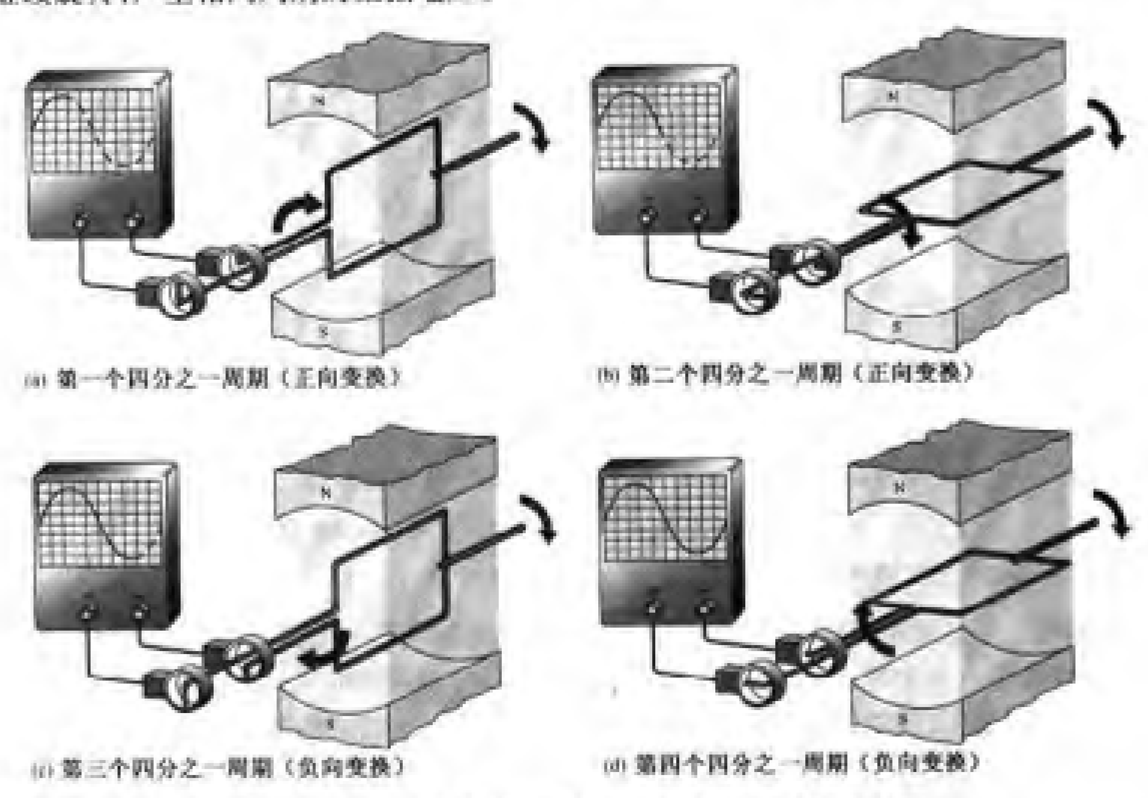
图 11.10 简易交流发生器

正如第 10 章所介绍的,一个导体穿过磁场移动时有电压产生。图 11.11 说明在导线圈旋转时,简易交流发生器是如何产生正弦电压的。示波器可以显示出电压的波形。

起初,图 11.11 (a)显示了导线圈旋转第一个四分之一周的情况。在水平位置产生的瞬时电压是零,而到了垂直位置,瞬时电压最大。在水平位置时,导线圈的瞬时运动方向平行于磁力线,磁力线存在于磁场南北极之间,因而没有磁力线被切割,电压为零。当导线圈旋转通过第一个四分之一周期时,穿过线圈的磁通线增多。当导线圈瞬时移动到垂直于磁通线的垂直位置时切割的磁通线最多,因而在四分之一周期内产生的电压从零增加到最大值。如图 11.11(a)所示,这部分旋转产生了第一个四分之一的正弦波,电压值从零增加到正向最大。

图 11.11(b)显示导线圈完成第一个半周期。在这个旋转过程中，电压从正向最大降到零，此时通过导线圈的磁通线减少。

在第二个半周期，如图 11.11(c)和图 11.11(d)所示，导线圈反向切割磁力线，所以产生的电压极性和第一个正半周期相反。当导线圈完成一个周期时，一个完整周期的正弦电压产生。导线圈继续旋转，产生相同周期的正弦电压。



(a) 第一个四分之一周期（正向变换） (b) 第二个四分之一周期（正向变换）

(c) 第三个四分之一周期（负向变换） (d) 第四个四分之一周期（负向变换）

图 11.11 导线圈旋转一周产生一个周期正弦电压的过程

频率 上面已经介绍了在简单的交流发生器(也称为交变电源)为导体穿越磁场产生周期性正弦交流电压的过程。很显然导体旋转的速率决定了完成一个周期的时间。例如，如果导体在 1 秒内旋转 60 周，那么正弦波的周期就是 1/60 秒，对应的频率是 60 Hz。因而导体旋转越快，产生的电压频率越高，如图 11.12 所示。

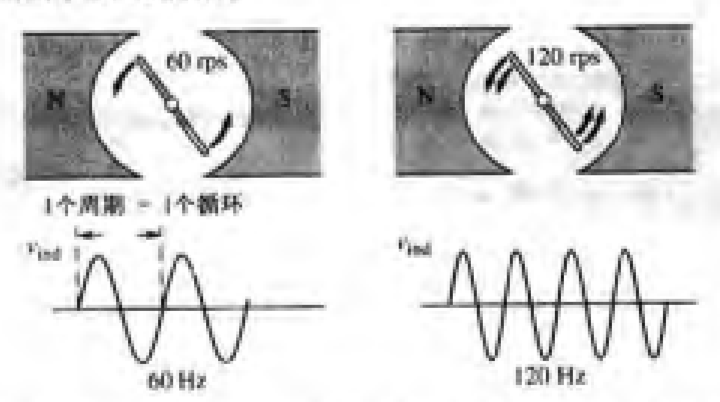


图 11.12 频率直接和交流发生器中导线圈的旋转速率成正比

另一种获得高频率的方法是增加磁极的数目。在先前的讨论中，两个磁极常用来解释交流发生器的原理。在一个旋转周期中，导体经过北极和南极，因而产生了一个周期的正弦交流波。

用四个磁极代替两个磁极，如图 11.13 所示，一个周期在半个循环中产生。在同样的旋转速率下，其频率增加了一倍。

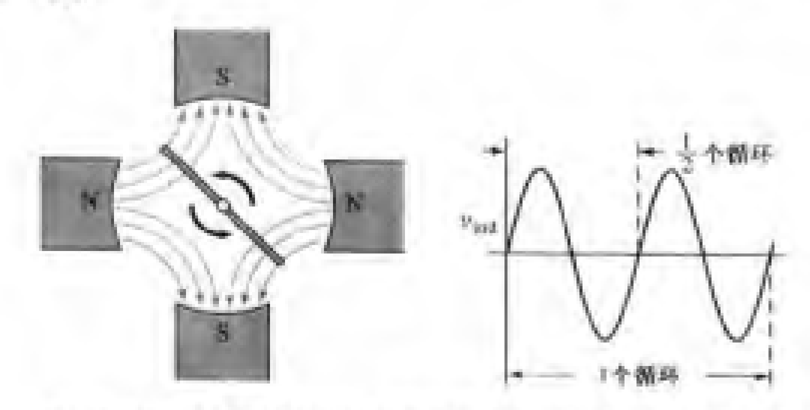


图 11.13　四个磁极产生的频率比两个同样磁极产生的频率高

频率可以用磁极的对数和每秒旋转的次数表示如下：

$$f = 磁极对数 \times 每秒旋转次数 \tag{11.3}$$

例 11.6　一个四极发生器的旋转速率是每秒 100 转，确定其输出电压频率。

解：

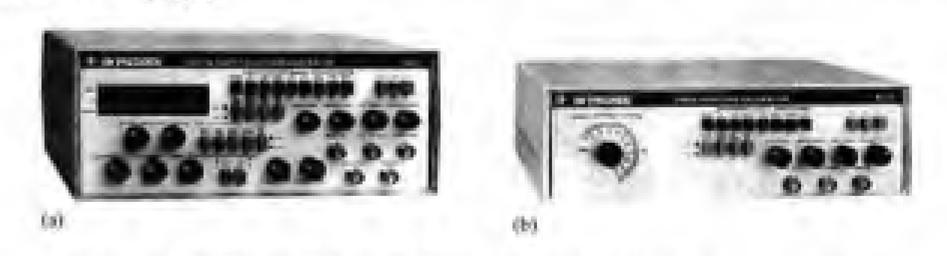
$$f = 磁极对数 \times 每秒旋转次数 = 2 \times 100 = 200\ \text{Hz}$$

练习：如果四极发生器的输出频率是 60 Hz，则每秒转数是多少？

电压振幅　回忆第 10 章，在线圈中感应的电压取决于线圈的匝数和在磁场中的变化率。因此，导体的旋转速率增加时，不仅所产生电压的频率增加，而且感应电压的振幅也增加。因而频率值通常也跟着变化，最常用的增大输出电压的方法是增加导线圈的数目。

11.2.2　电信号发生器

电信号发生器是一种通过电子产生正弦波的装置，用来测试和控制电子电路系统。有很多不同的信号发生器，从在有限频率范围内产生特定波形的装置，到大频率范围内产生各种波形的可编程装置。总的来说，这些装置产生了各种波形，称为函数发生器。所有信号发生器都包括简单的振荡器，一种能提供重复波形的电子电路。所有发生器都能变化振幅和频率，标准的信号发生器如图 11.14 所示。



(a)　　(b)

图 11.14　典型的信号发生器(图片的使用经 B&K Precision Corp. 许可)

11.2 节练习

1. 哪两种基本方法用来产生正弦电压？
2. 在交流发生器中旋转速率和频率关系如何？
3. 什么是振荡器？

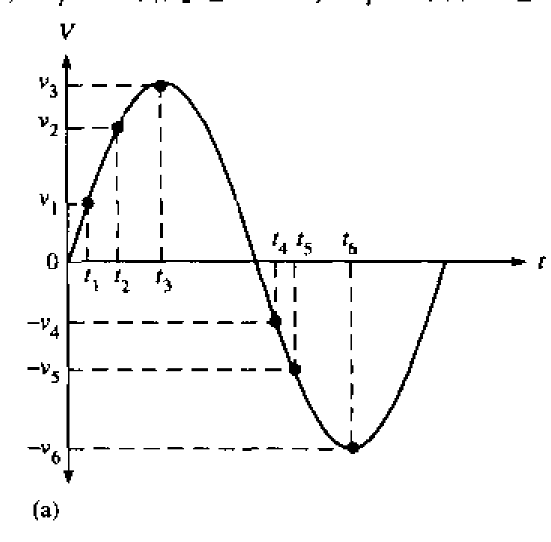
11.3 正弦波的电压值和电流值

就电压和电流而言,有 5 种表示正弦波的参数:瞬时值、峰值、峰 - 峰值、rms 值和平均值。学完本节以后,读者应该能够:

- 确定正弦波的不同电压和电流值
- 求任意时刻的瞬时值
- 求峰值
- 求峰 - 峰值
- 确定 rms 值
- 解释为什么在完成一个整周期后平均值总是零
- 求半周期的平均值

11.3.1 瞬时值

图 11.15 说明在任意时刻正弦波的电压或电流都有瞬时值。这个瞬时值沿着曲线上的不同点是不同的。瞬时值在正交变时是正的,在负交变时是负的。电压和电流的瞬时值小写表示为 v 和 i。图 11.15(a)中的曲线只显示了电压,但是在用 i 代替 v 时,该曲线对电流同样适用。例如,如图 11.15(b)所示,1 μs 时瞬时电压 3.1 V;2.5 μs 时瞬时电压 7.07 V;5 μs 时瞬时电压 10 V;10 μs 时瞬时电压 0 V;11 μs 时瞬时电压 - 3.1 V,等等。



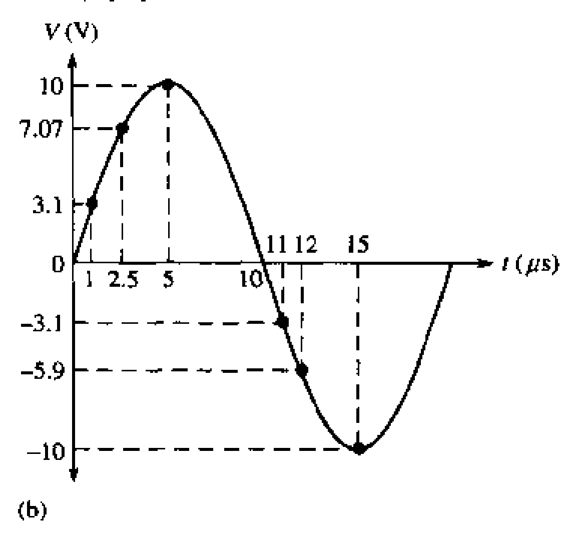


图 11.15 瞬时值

11.3.2 峰值

正弦波的峰值是电压(或电流)从零点到正的最大值或负的最大值。由于所有峰值大小相等,正弦波的特点能用单个峰值来表征。如图 11.16 所示,对一个给定的正弦波,峰值不变,并用 V_p 或者 I_p 表示。

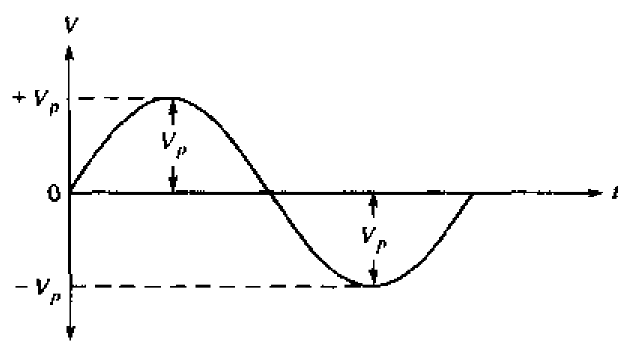


图 11.16 峰值

11.3.3 峰-峰值

如图 11.17 所示，正弦波的峰-峰值是从正的波峰到负的波峰的电压值或电流值。如下列方程所示，峰-峰值通常是峰值的两倍。电压或者电流的峰-峰值通常用 V_{pp} 或者 I_{pp} 表示。

$$V_{pp} = 2V_p \tag{11.4}$$

$$I_{pp} = 2I_p \tag{11.5}$$

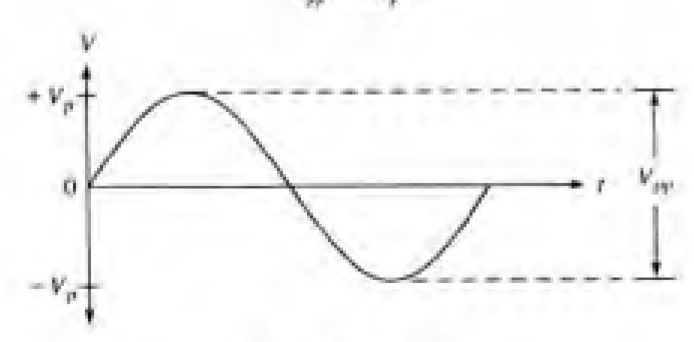


图 11.17 峰-峰值

11.3.4 rms 值

名词 rms 代表均方根，均方根值也称有效值。大部分交流电压表都能显示均方根电压。墙上电源插座输出的 110 V 就是均方根值。

正弦电压的均方根值实际上是衡量正弦波热效能的一种方法。例如，如图 11.18(a)所示，一个电阻和交流电压源连接在一起时，电阻能产生相当数量的热能。图 11.18(b)显示了同样的电阻连接到一个直流电压源上，调整直流电压源的电压值，使电阻产生的热能和电阻连接到交流电压源上产生的热能相等。

正弦电压的均方根值是一个直流电压，这个直流电压在电阻上产生的热能和正弦电压在同一电阻上产生的热能相等。

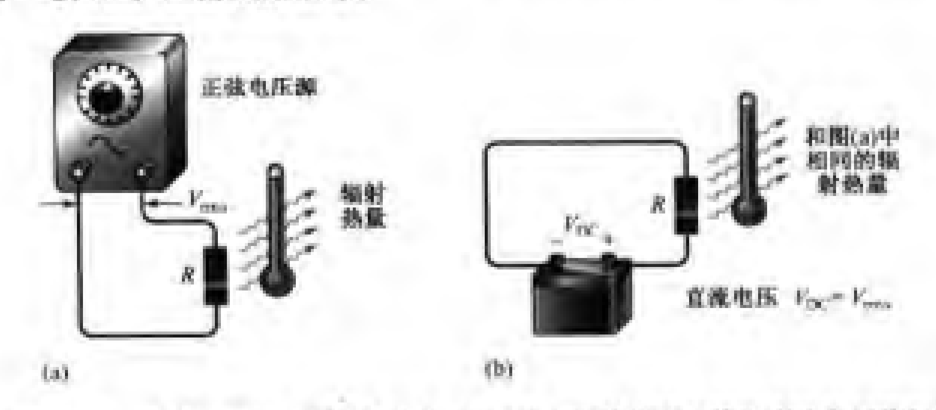


图 11.18 两套装置产生同样的热能时，正弦电压的均方根值和直流电压值相等

运用下列关系可以根据正弦波的峰值推导出对应的均方根值，并且在附录 C 中对其电压和电流都进行了推导：

$$V_{rms} = 0.707V_p \tag{11.6}$$

$$I_{rms} = 0.707I_p \tag{11.7}$$

用这些方程同样可以根据已知的均方根值推导出峰值。

$$V_p = \frac{V_{rms}}{0.707}$$
$$V_p = 1.414V_{rms} \quad (11.8)$$

同样，

$$I_p = 1.414I_{rms} \quad (11.9)$$

只要将峰值加倍后即可得到峰-峰值：

$$V_{pp} = 2.828V_{rms} \quad (11.10)$$

和

$$I_{pp} = 2.828I_{rms} \quad (11.11)$$

11.3.5　平均值

完成一个完整周期的正弦波的平均值通常都是零，因为正值（零位置以上的值）和负值（零位置以下的值）相互抵消了。

为了某些特定目的，例如衡量电源产生的不同类型电压，正弦波的平均值定义为对应半个周期，而不是一个整周期。在这里，平均值指半周期曲线下的总面积除以水平轴上曲线所用的时间。在附录 C 中对结果进行了推导，对正弦电压和正弦电流，可以用下列公式通过峰值项表示。

$$V_{avg} = \left(\frac{2}{\pi}\right)V_p$$
$$V_{avg} = 0.637V_p \quad (11.12)$$

$$I_{avg} = \left(\frac{2}{\pi}\right)I_p$$
$$I_{avg} = 0.637I_p \quad (11.13)$$

例 11.7　确定图 11.19 所示正弦波的 V_p，V_{pp}，V_{rms}和半周期 V_{avg}。

解：从图中可以直接读出 V_p = **4.5 V**，通过这个值可以计算其他值。

$$V_{pp} = 2V_p = 2(4.5\text{ V}) = \mathbf{9\ V}$$
$$V_{rms} = 0.707V_p = 0.707(4.5\text{ V}) = \mathbf{3.18\ V}$$
$$V_{avg} = 0.637V_p = 0.637(4.5\text{ V}) = \mathbf{2.87\ V}$$

练习：如果 V_p = 25 V，确定正弦电压的 V_{pp}，V_{rms}和 V_{avg}。

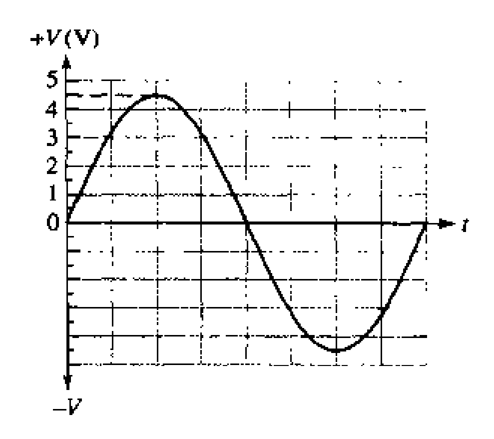


图 11.19

11.3 节练习

1. 确定下列每种情况的 V_{pp}：
   (a) V_p = 1 V　(b) V_{rms} = 1.414 V　(c) V_{avg} = 3 V
2. 确定下列每种情况的 V_{rms}：
   (a) V_p = 2.5 V　(b) V_{pp} = 10 V　(c) V_{avg} = 1.5 V

3. 确定下列每种情况的半周期 V_{avg}:
   (a) $V_p = 10\ V$ (b) $V_{rms} = 2.3\ V$ (c) $V_{pp} = 60\ V$

11.4 正弦波的角度测量

如上所述,正弦波能用水平时间轴衡量;与此同时,由于完成一个完整周期或者部分周期的时间都与频率有关,因此用度或者弧度这样的角度项来标定正弦波非常有益。

学完本节以后,读者应该能够:

- 描述正弦波的角度关系
- 用角度测量正弦波
- 解释弧度的概念
- 把弧度转换为度
- 测定正弦波的相角

可以通过交流发生器产生一个正弦信号。交流发生器的转子完成一个完整的360°旋转时,产生的输出电压是一个完整周期的正弦波。因此,正弦波的角度测量和发生器的角位移有关,如图11.20所示。

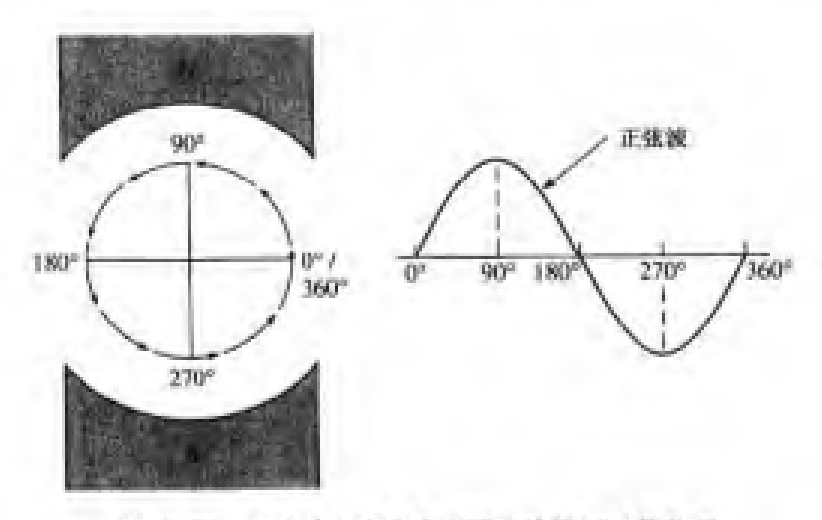


图11.20 正弦波和交流发生器中旋转运动的关系

11.4.1 角度测量

1度是对应于1/360的弧或者1/360圆周运动的角度测量。1弧度是沿圆的圆周长度与圆的半径相等的角度测量。1弧度(rad)等于57.3°,如图11.21所示。在360°圆周内,有2π弧度。

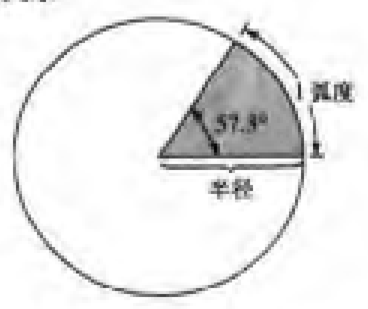


图11.21 图示弧度(rad)和度(°)关系的角度测量

希腊字母π(pi),表示任何圆的圆周长度与其直径的比值,并且π有恒定的近似值3.1416。

计算器包括π函数,以便不必再输入π的实际数值。

表 11.1 列出了一些度及其所对应的弧度值，这些角度测量如图 11.22 所示。

表 11.1

度(°)	弧度(rad)
0	0
45	$\pi/4$
90	$\pi/2$
135	$3\pi/4$
180	π
225	$5\pi/4$
270	$3\pi/2$
315	$7\pi/4$
360	2π

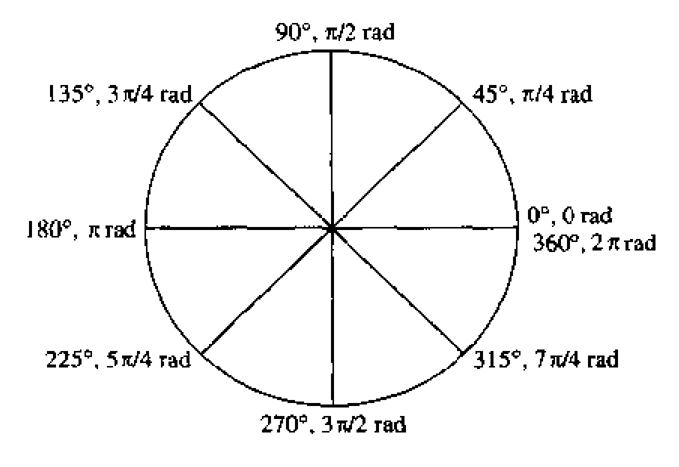


图 11.22　从 0°开始沿逆时针方向的角度测量

11.4.2 弧度/度的转换

用式(11.14)可以将度转换为弧度：

$$弧度 = \left(\frac{\pi\ 弧度}{180^\circ}\right) \times 度 \tag{11.14}$$

同样，用式(11.15)可以将弧度转换为度：

$$度 = \left(\frac{180^\circ}{\pi\ \text{rad}}\right) \times 弧度 \tag{11.15}$$

例 11.8　(a) 将 60°转换为弧度。　　(b) 将 $\pi/6$ 转换为度。

解：(a) $弧度 = \left(\frac{\pi\ \text{rad}}{180^\circ}\right)60^\circ = \frac{\pi}{3}\ \textbf{rad}$　　(b) $度 = \left(\frac{180^\circ}{\pi\ \text{rad}}\right)\left(\frac{\pi}{6}\text{rad}\right) = \mathbf{30^\circ}$

练习：(a) 把 15°转换为弧度。　　(b) 把 2π 转换为度。

11.4.3 正弦波的角度

正弦波的角度测量是基于 360°或 2π 弧度的一个完整周期。半个周期是 180°或 π 弧度；四分之一周期是 90°或 $\pi/2$ 弧度，等等。图 11.23(a)显示了正弦波一个完整周期基于度的表示；图 11.23(b)中则是用弧度表示相同的点。

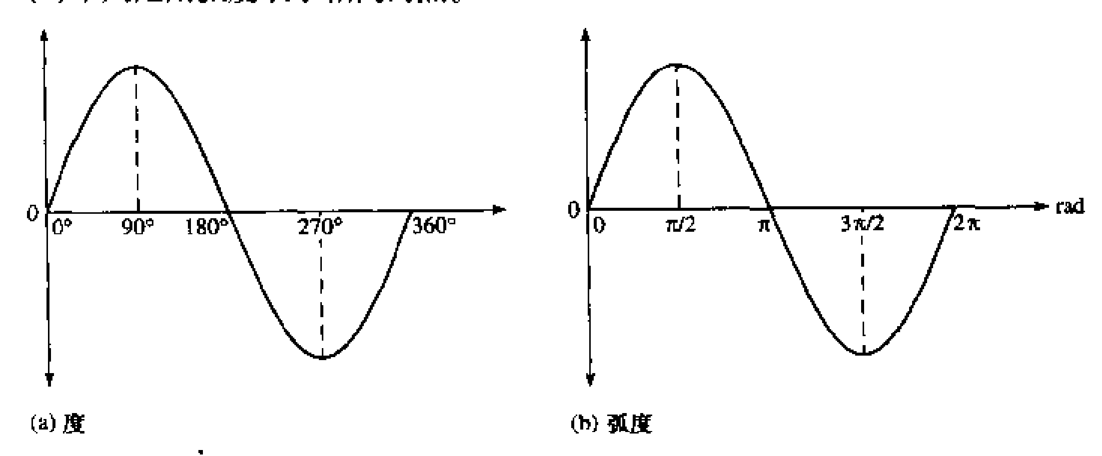


图 11.23　正弦波的角度

11.4.4　正弦波的相位

正弦波的相位是说明正弦波相应位置关系的一种角度测量。图 11.24 显示了用这种位置关系表示的正弦波的一个周期。注意第一个正向零相交的点(零点)是 0°(0 弧度),正波峰是 90°($\pi/2$ 弧度)。负向零相交的点是 180°(π 弧度),负波峰是 270°($3\pi/2$ 弧度)。周期在 360°(2π 弧度)结束。正弦波根据希望左右移动相应的位置时,就发生相移。

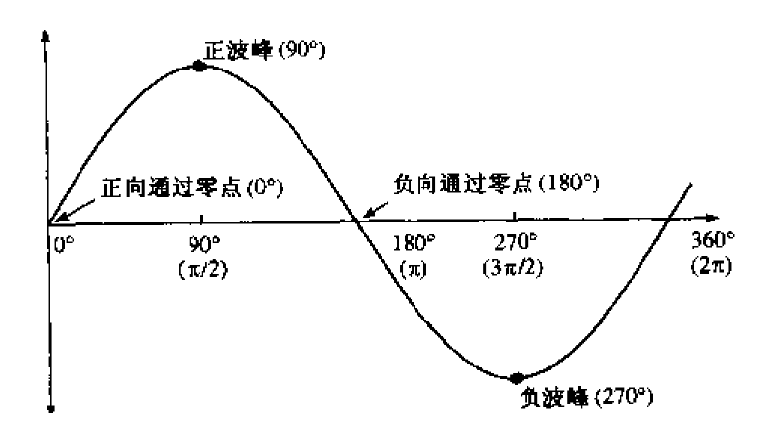
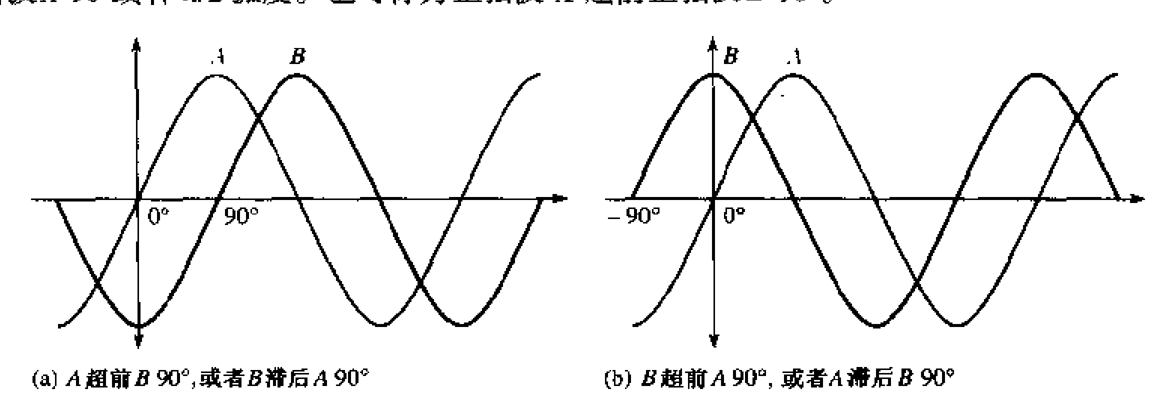


图 11.24　相位关系

图 11.25 显示了一个正弦波的相移。在图 11.25(a)中,正弦波 B 向右移动了 90°($\pi/2$ 弧度),因此在正弦波 A 和正弦波 B 之间有 90°的相角。在这个过程中,正弦波 B 的正波峰比正弦波 A 的正波峰出现得晚一些,因为沿横坐标向右的时间逐渐增大。在这种情况下,说正弦波 B 滞后正弦波 A 90°或者 $\pi/2$ 弧度。也可称为正弦波 A 超前正弦波 B 90°。



(a) A 超前 B 90°,或者 B 滞后 A 90°　　(b) B 超前 A 90°,或者 A 滞后 B 90°

图 11.25　相移图示

在图 11.25(b)中,正弦波 B 向左移动了 90°。因而在正弦波 A 和正弦波 B 之间有 90°的相角。在这种情况下,正弦波 B 的波峰比 A 早发生,因此说正弦波 B 比 A 超前 90°。一个正弦波向左移动 90°则称为余弦波。

例 11.9　图 11.26(a)和图 11.26(b)中,两个正弦波之间的相角各是多少?

解: 在图 11.26(a)中,正弦波 A 在 0°时零相交,而对应的正弦波 B 在 45°时零相交。因此这两个波形之间有 45°相角,并且正弦波 B 滞后正弦波 A。

在图 11.26(b)中,正弦波 B 在 -30°时零相交,而对应的正弦波 A 在 0°时零相交。因此这两个波形之间有 30°相角,并且正弦波 B 超前正弦波 A。

练习: 如果一个正弦波正向零相交在 15°处,而第二个正弦波在 23°处,那么它们之间的相角是多少?

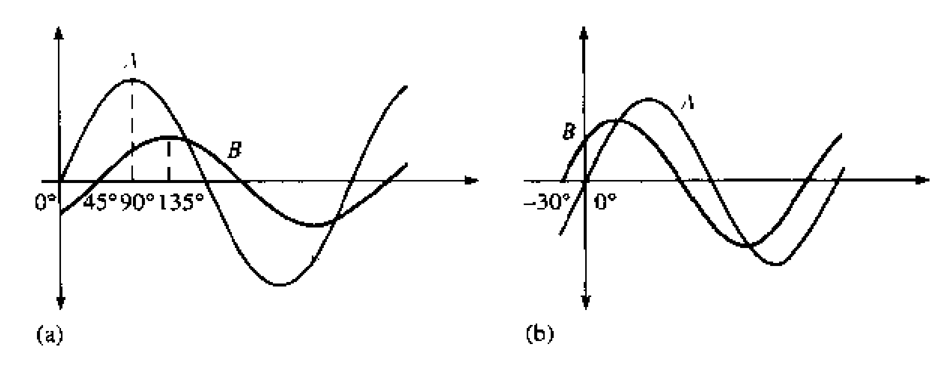


图 11.26

在一般情况下，从示波器测量两个波形之间的相移时，应该使其具有相同的幅度。可以调整示波器某个通道的纵坐标刻度，直到其对应的波形具有和另一个波形相似的幅度。如果这两个波形没有在准确的中心来测量，这个过程将会出现错误。

11.4 节练习

1. 当一个正弦波在 0°位置正向零相交时，下列每个点在什么角度时出现？
   (a) 正波峰　　(b) 正向零相交
   (c) 负波谷　　(d) 第一个完整周期结束
2. 半周期在____度或者____弧度结束。
3. 整个周期在____度或者____弧度结束。
4. 确定图 11.27 所示两个正弦波之间的相角。

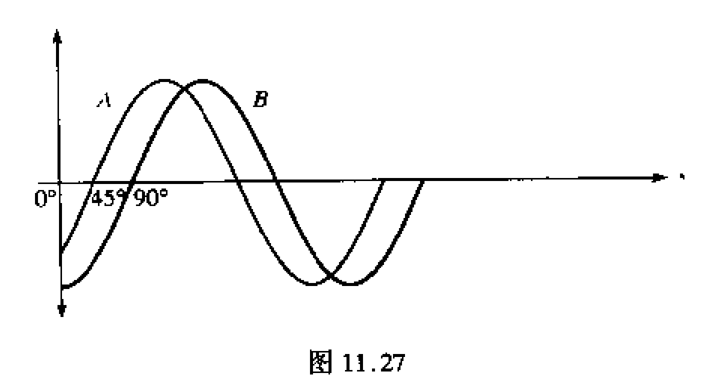


图 11.27

11.5 正弦波公式

一个正弦波可以用纵轴上的电压或电流值及横轴上的角度测量(度或者弧度)来表示。如同将要介绍的那样，这幅图能用数学的方式表示出来。

学完本节以后，读者应该能够：

- 用数学方式分析正弦波
- 阐述正弦波公式
- 利用公式找到瞬时值

图 11.28 显示了普通正弦波的一个周期。正弦波的幅度 A 代表纵轴上电压或电流的最大值；横轴代表角度值；变量 y 代表电压或电流在给定角度 θ 的瞬时值。符号 θ 是希腊字母 theta。

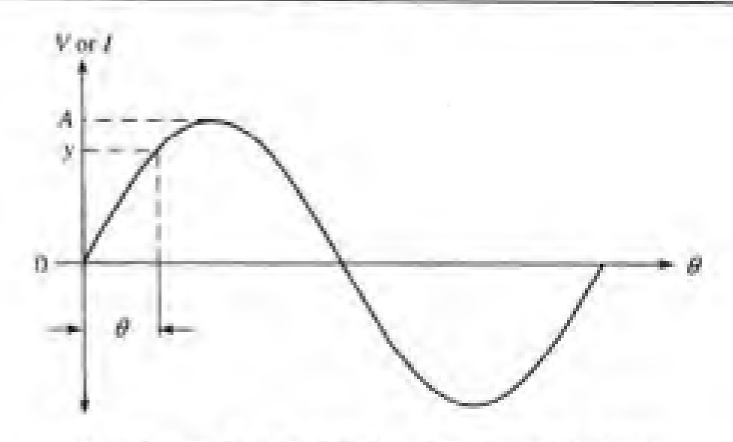


图 11.28　显示普通正弦波一个周期的幅度和相位

所有正弦波都遵循一个特定的数学公式。图 11.28 所示正弦曲线的一般表达式为：

$$y = A\sin\theta \tag{11.16}$$

这个公式说明正弦波上任意一点都有一个瞬时值(y)，等于在这点上相角 θ 的正弦值(sin)乘以最大值 A。例如，某个正弦电压的波峰值是 10 V，则在水平轴上 60°这一点的瞬时电压可以按以下方法来计算，在这里 $y = v$，$A = V_p$：

$$v = V_p\ \sin\theta = (10\ \text{V})\sin 60° = (10\ \text{V})(0.866) = 8.66\ \text{V}$$

图 11.29 给出了曲线上这个特定的瞬时值。能在计算器上算出任意角的正弦值，只要先输入角度值，再按[sin]键即可。在度的模式下验证你的计算器。TI-86 型计算器可以通过按[2nd][MODE]键来设为度的模式，并用箭头键使屏幕上"Degree"闪亮，接着按[ENTER]键。

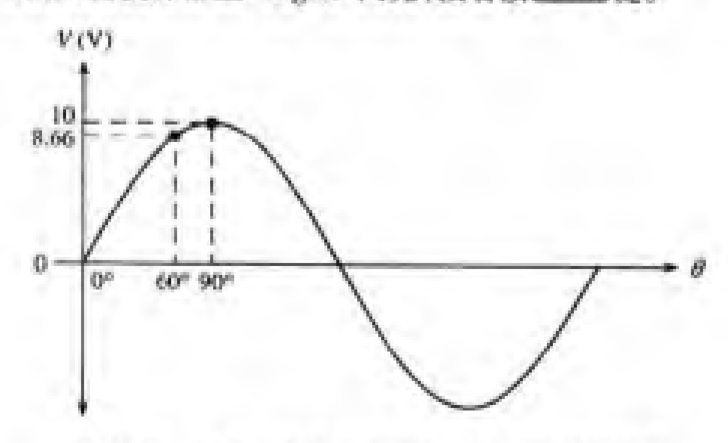


图 11.29　图示一个正弦电压在 $\theta = 60°$时的瞬时值

11.5.1　正弦波相移表示

当一个正弦波相对于参照物向右移动(滞后)给定的相角 ϕ，如图 11.30(a)所示，在这里纵轴是参照物，则一般表达式为：

$$y = A\sin(\theta - \phi) \tag{11.17}$$

在这里，y 代表瞬时电压或电流，A 代表峰值(幅度)。当一个正弦波相对于参照物向左移动(超前)给定的相角 ϕ，如图 11.30(b)所示，则一般表达式为：

$$y = A\ \sin(\theta + \phi) \tag{11.18}$$

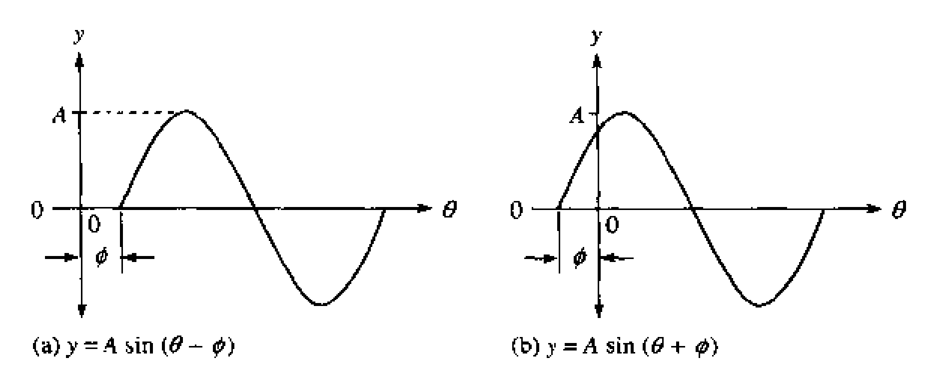


图 11.30　移动的正弦波

例 11.10　确定图 11.31 所示的每一个正弦电压在水平参考位置 90°的瞬时值。

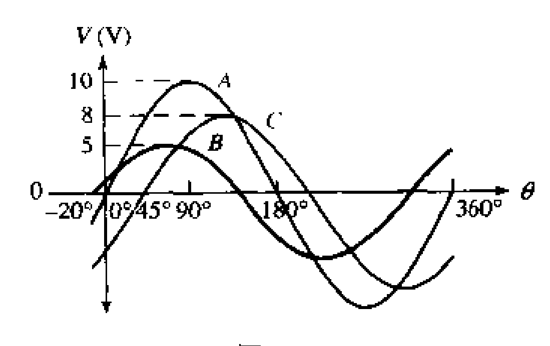


图 11.31

解：以正弦波 A 作为参考，正弦波 B 相对于正弦波 A 左移了 20°，因此它是超前的。正弦波 C 相对于正弦波 A 右移了 45°，因此它是滞后的。

$$v_A = V_p\sin\theta$$
$$= (10\ \text{V})\sin(90°) = (10\ \text{V})(1) = \mathbf{10\ V}$$
$$v_B = V_p\sin(\theta + \phi_B)$$
$$= (5\ \text{V})\sin(90° + 20°) = (5\ \text{V})\sin(110°) = (5\ \text{V})(0.9397) = \mathbf{4.70\ V}$$
$$v_C = V_p\sin(\theta - \phi_C)$$
$$= (8\ \text{V})\sin(90° - 45°) = (8\ \text{V})\sin(45°) = (8\ \text{V})(0.7071) = \mathbf{5.66\ V}$$

练习：一个正弦电压的峰值是 20 V。那么在相角是 65°时，相对于它零相交的瞬时值是多少？

11.5 节练习

1. 计算图 11.29 所示的正弦电压在 120°时的瞬时值。
2. 确定相对于零参考位置左移 10°的正弦电压在 45°点的瞬时值（V_p = 10 V）。
3. 确定相对于零参考位置右移 25°的正弦电压在 90°点的瞬时值（V_p = 5 V）。

11.6　交流电路中的欧姆定律和基尔霍夫定律

随时间变化的交流电压，例如正弦电压，作用于一个电路，则先前所学过的电路定律仍然适用。交流电路中欧姆定律和基尔霍夫定律的应用与其在直流电路中的应用方法相同。

学完本节以后，读者应该能够：

- 在交流阻抗电路中应用基本电路定律
- 在含有交流信号源的阻抗电路中应用欧姆定律
- 在含有交流信号源的阻抗电路中应用基尔霍夫电压定律和电流定律



如图 11.32 所示，如果一个正弦电压作用于一个电阻两端，会产生一个正弦电流。当电压是零时，电流也是零；而当电压最大时，电流也最大；当电压极性改变时，电流方向也随之发生翻转。因此说电压和电流是同相的。

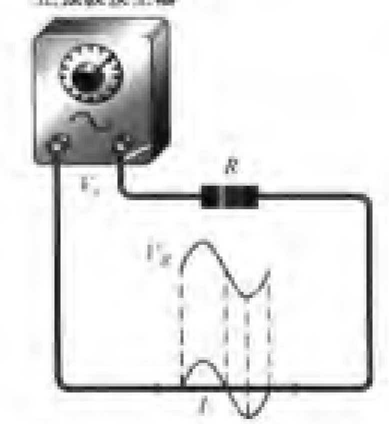


图 11.32 正弦电压产生正弦电流

在交流电路中应用欧姆定律时，牢记若用峰值、均方根值和平均值等表示时，电压和电流一定要表达一致。

例 11.11 确定图 11.33 所示的每个电阻两端的均方根电压和流过的均方根电流，信号源电压给定的是均方根值。

解： 电路的总电阻是：

$$R_T = R_1 + R_2 = 1.0\ \text{k}\Omega + 560\ \Omega = 1.56\ \text{k}\Omega$$

利用欧姆定律找出均方根电流：

$$I_{rms} = \frac{V_{s(rms)}}{R_T} = \frac{110\ \text{V}}{1.56\ \text{k}\Omega} = \mathbf{70.5\ mA}$$

作用于每个电阻的均方根电压是：

$$V_{1(rms)} = I_{rms}R_1 = (70.5\ \text{mA})(1.0\ \text{k}\Omega) = \mathbf{70.5\ V}$$

$$V_{2(rms)} = I_{rms}R_2 = (70.5\ \text{mA})(560\ \text{k}\Omega) = \mathbf{39.5\ V}$$

练习： 当信号源电压是 10 V 峰值时，重复这道例题。

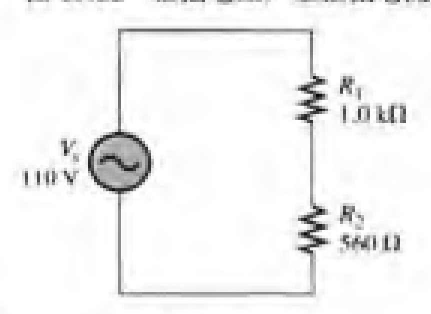


图 11.33

基尔霍夫电压定律和电流定律在交流电路中和在直流电路中的应用方法相同。如图 11.34 所示，基尔霍夫电压定律应用于一个含有正弦电压信号源的阻抗电路。正如图中所示，像在直流电路中一样，信号源电压是所有电阻两端电压的和。

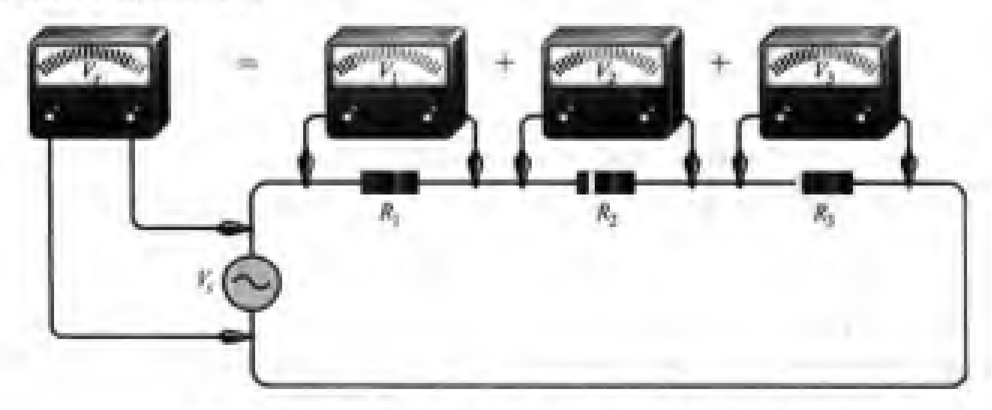


图 11.34 交流电路中基尔霍夫电压定律的应用

例 11.12 图 11.35 中给定的所有值都是均方根值。

(a) 找出图 11.35(a) 中未知的峰值电压。

(b) 找出图 11.35(b) 中总的均方根电流。

解： (a) 利用基尔霍夫电压定律找出 V_3：

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_{3(rms)} = V_{s(rms)} - V_{1(rms)} - V_{2(rms)} = 24\ \text{V} - 12\ \text{V} - 8\ \text{V} = 4\ \text{V}$$

将均方根转换为峰值：

$$V_{3(p)} = 1.414V_{3(rms)} = 1.414(4\ \text{V}) = \mathbf{5.66\ V}$$

(b) 利用基尔霍夫电流定律找出 I_{tot}：

$$I_{tot(rms)} = I_{1(rms)} + I_{2(rms)} = 10\text{ A} + 3\text{ A} = \mathbf{13\ A}$$

练习：一个串联电流有下列电压降：$V_{1(rms)} = 3.50\text{ V}$，$V_{2(p)} = 4.25\text{ V}$，$V_{3(avg)} = 1.70\text{ V}$。确定信号源电压的峰-峰值。

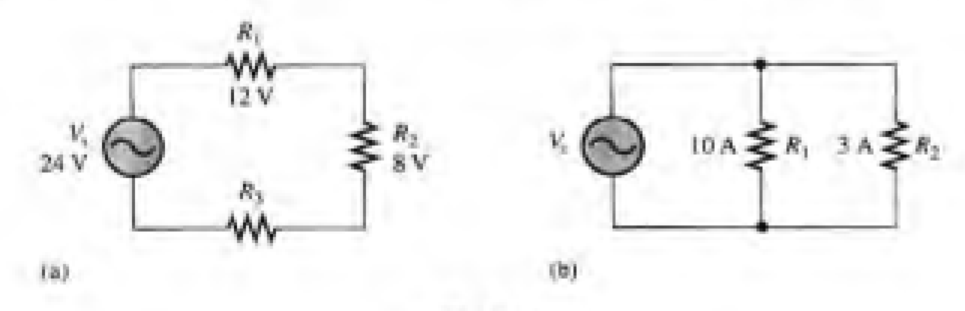


图 11.35

11.6 节练习

1. 一个半周期平均值为 12.5 V 的正弦电压作用于一个电阻为 330 Ω 的电路，那么电路的峰值电流是多少？
2. 一个串联阻抗电路的各电阻峰值电压降分别是 6.2 V，11.3 V 和 7.8 V，那么信号源电压的均方根值是多少？

11.7　直流电压和交流电压的叠加

在许多实际电路中，交流电压和直流电压是结合在一起的。例如在放大电路中，交流信号电压就叠加在直流工作电压上。这是我们在第 8 章所学的叠加原理最普遍的应用。

学完本节以后，读者应该能够：

- 确定既有直流成分又有交流成分的总电压

如图 11.36 所示，一个直流源和一个交流源串联，电阻两端的电压为两个电压代数和，即一个直流电平基础上的交流电压。

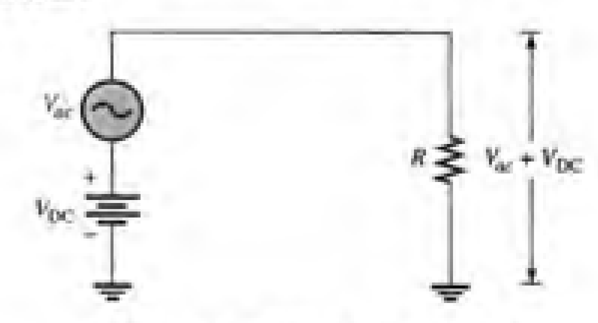
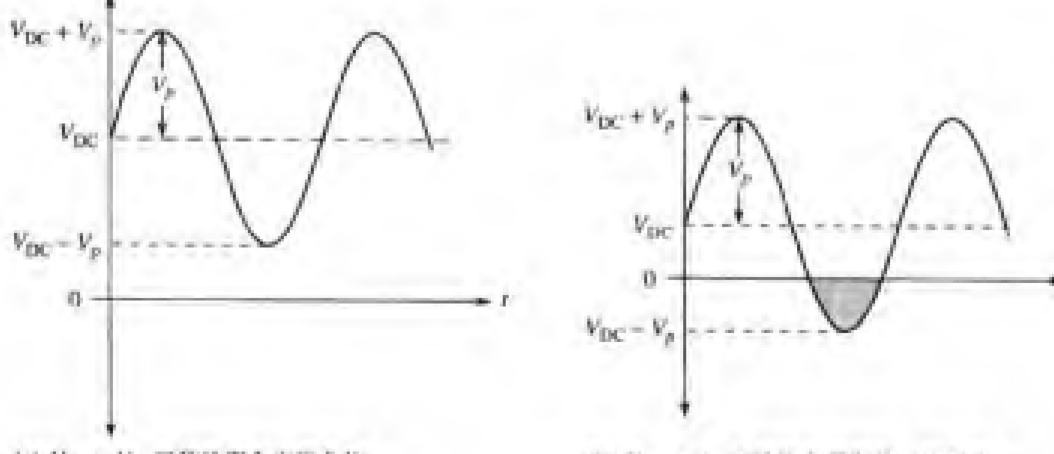


图 11.36　直流电压和交流电压的叠加

如果 V_{DC} 比正弦电压的峰值大得多，这个相加的电压就是一个不会发生极性翻转的正弦波，如图 11.37(a)所示，正弦波叠加在直流电平上。如果 V_{DC} 比正弦电压的峰值小得多，如图 11.37(b)所示，正弦波将在其下半周部分中出现负值。在每种情况下，正弦波都将达到一个最大值电压 $V_{DC} + V_p$ 和一个最小值电压 $V_{DC} - V_p$。



(a) $V_{DC} > V_p$，正弦波不会出现负值

(b) $V_{DC} < V_p$，正弦波在周期的一部分发生极性翻转，在图中用灰色显示

图 11.37 具有交流电平的正弦波

例 11.13 确定图 11.38 所示每个电路中电阻两端电压的最大值和最小值。

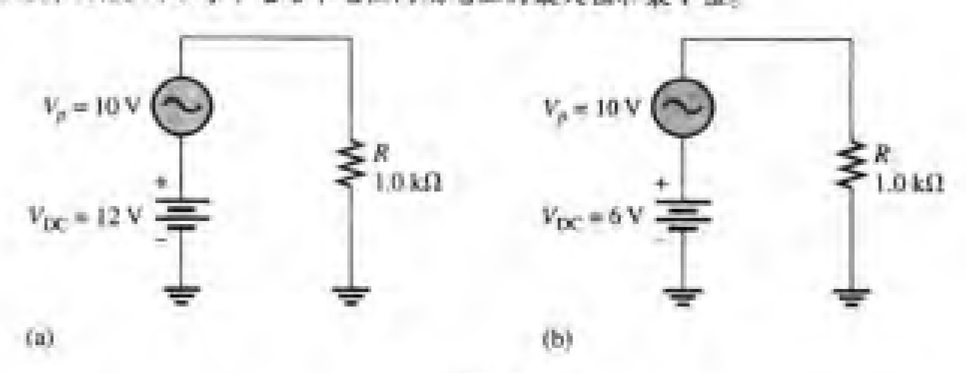


图 11.38

解：在图 11.38(a)中，电阻 R 两端的电压最大值是：

$$V_{max} = V_{DC} + V_p = 12\text{ V} + 10\text{ V} = \mathbf{22\ V}$$

电阻 R 两端的电压最小值是：

$$V_{min} = V_{DC} - V_p = 12\text{ V} - 10\text{ V} = \mathbf{2\ V}$$

因此，如图 11.39(a)所示，$V_{R(ac)}$ 是一个在 +22 V 和 +2 V 之间变化的极性不变的交变电压。

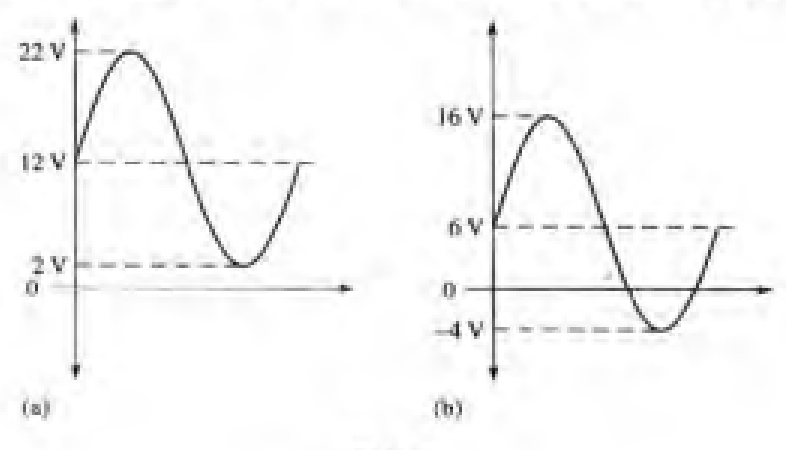


图 11.39

在图 11.38(b)中，电阻 R 两端的电压最大值是：

$$V_{max} = V_{DC} + V_p = 6\text{ V} + 10\text{ V} = \mathbf{16\ V}$$

电阻 R 两端的电压最小值是：

$$V_{min} = V_{DC} - V_p = \mathbf{-4\ V}$$

因此，如图 11.39(b)所示，$V_{R(tot)}$是一个在 +16 V 和 -4 V 之间极性变化的交变电压。

练习：解释为什么图 11.39(a)中的波形是非交流的，而图 11.39(b)中的波形是交流的。

11.7 节练习

1. 当一个 $V_p = 5$ V 的正弦波叠加到 +2.5 V 的直流电压上时，得到的总电压正向最大值是多少？
2. 第 1 个问题中得到的电压极性变化了吗？
3. 如果第 1 个问题中的直流电压是 -2.5 V，得到的总电压正向最大值是多少？

11.8 非正弦波形

正弦波在电子学中是很重要的，但并不意味着是随时间变化波形的惟一类型。下面将讨论其他两种重要的波形，即脉冲波形和三角波形。

学完本节以后，读者应该能够：

- 区别基本非正弦波的特点
- 讨论脉冲波形的性质
- 定义占空因数
- 讨论三角波形和锯齿波形的性质
- 讨论一个波形的谐波包含的内容

11.8.1 脉冲

简单说来，脉冲可以描述为电压或电流电平（基线）快速跃变（前沿）到另一个电平，然后经过一个时间间隔，又快速跃变（后沿）回原始基线电平。这个电平上的跃变也叫做阶梯，理想的脉冲由两个幅度相同而变化方向相反的阶梯组成。当前沿或者后沿是正向阶梯时，称为上升沿；当前沿或者后沿是反向阶梯时，称为下降沿。

图 11.40(a)显示了一个理想的正向脉冲，由两个被时间间隔（脉冲宽度）分开的数值相等但方向相反的瞬时阶梯组成。图 11.40(b)显示了一个理想的负向脉冲，以基线为基准测量的脉冲高度是电压或电流的幅度。

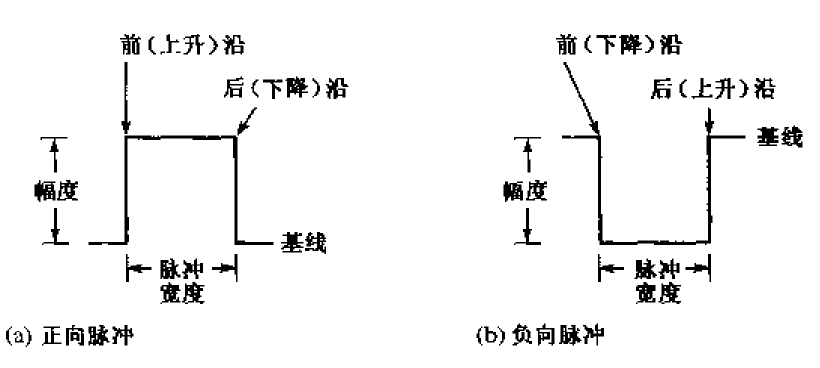


图 11.40 理想脉冲

在许多应用中,把所有脉冲都当做理想的(由瞬时阶梯组成,并且形状是矩形)来分析是很简单的。然而实际脉冲都不是理想的,都有一定的特性,因而不同于理想脉冲。

在实际情况中,脉冲是不能从一个电平瞬时转变为另一个电平的。如图 11.41(a)所示,转变通常都需要一定的时间。正如图中所示,脉冲在从低值上升到高值的上升沿过程中,是有一定时间间隔的。这个间隔叫做上升时间 t_r。

上升时间指脉冲从幅度的 10%上升到幅度的 90%所需要的时间。

脉冲在从高值下降到低值的下降沿过程中需要的时间间隔叫做下降时间 t_f。

下降时间指脉冲从幅度的 90%下降到幅度的 10%所需要的时间。

因为上升沿和下降沿不是垂直的,因此非理想脉冲的脉冲宽度 t_W 也需要一个准确的定义。

脉冲宽度指上升沿上幅度的 50%值点和下降沿上幅度的 50%值点之间的时间。

脉冲宽度如图 11.41(b)所示。

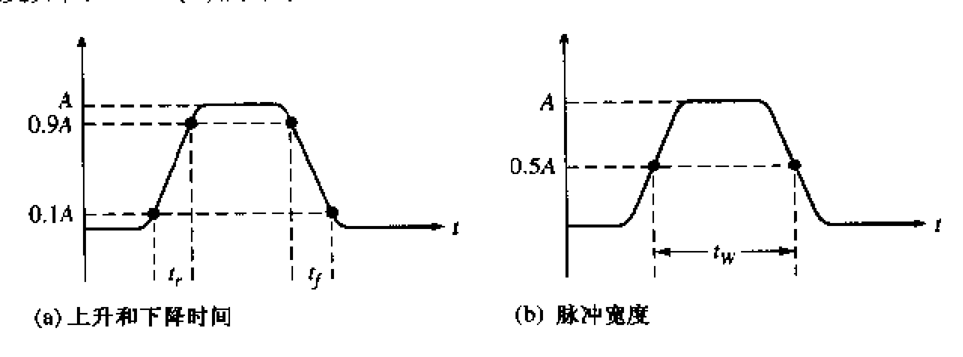


图 11.41 非理想脉冲

11.8.2 重复脉冲

在固定时间段内重复自身的波形是周期性的,图 11.42 显示了周期脉冲波形的几个例子。注意在每种情况下,脉冲都在固定的时间间隔内重复,重复的速率称为脉冲重复频率,并且是波形的基本频率,频率可以用赫兹或每秒脉冲数表示。从一个脉冲到下一个脉冲对应点所需要的时间是周期 T。重复脉冲的周期和频率之间的关系和正弦波是一样的,$f=1/T$。

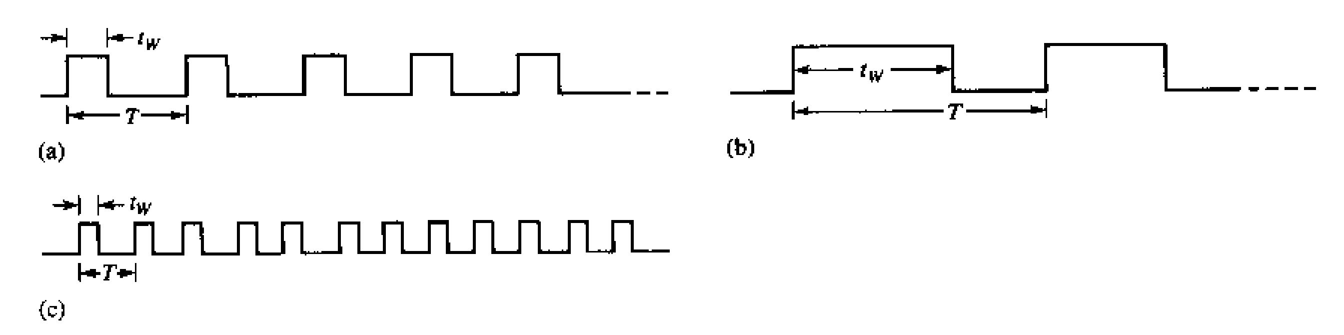


图 11.42 重复脉冲波形

重复脉冲的波形有一个非常重要的特性是占空因数。

占空因数是脉冲宽度(t_W)在周期(T)中所占的比率,通常用百分数来表示。

$$占空因数百分比 = \left(\frac{t_W}{T}\right)100\% \tag{11.19}$$

例 11.14　确定图 11.43 中脉冲波形的周期、频率和占空因数。

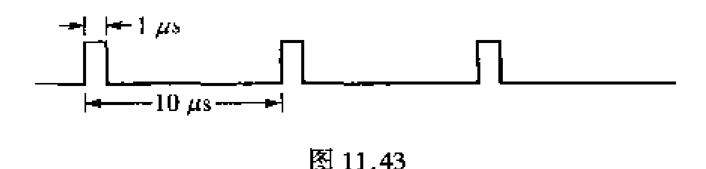


图 11.43

解：

$$T = \mathbf{10\ \mu s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10\ \mu\text{s}} = \mathbf{100\ kHz}$$

$$\text{占空因数百分比} = \left(\frac{1\ \mu\text{s}}{10\ \mu\text{s}}\right)100\% = \mathbf{10\%}$$

练习：某个脉冲波形的频率是 200 kHz，脉冲宽度是 0.25 μs，确定占空因数。

11.8.3　方波

方波是占空因数为 50% 的脉冲波形，因此其脉冲宽度是周期的一半。图 11.44 显示了一个方波。

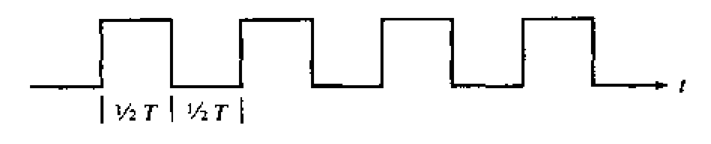


图 11.44　方波

11.8.4　脉冲波形的平均值

脉冲波形的平均值等于基线值加上占空因数和幅度的乘积。其中，基线为正向波形的低电平或者负向波形的高电平，方程式如下：

$$V_{avg} = \text{基线值} + (\text{占空因数})(\text{幅度}) \tag{11.20}$$

下例说明平均值的计算方法。

例 11.15　确定图 11.45 所示每个波形的平均值。

解：图 11.45(a) 中，波形的基线是 0 V，幅度是 2 V，占空因数是 10%，则平均值为：

$$V_{avg} = \text{基线值} + (\text{占空因数})(\text{幅度})$$
$$= 0\ \text{V} + (0.1)(2\ \text{V}) = \mathbf{0.2\ V}$$

图 11.45(b) 中，波形的基线是 +1 V，幅度是 5 V，占空因数是 50%，则平均值为：

$$V_{avg} = \text{基线值} + (\text{占空因数})(\text{幅度})$$
$$= 1\ \text{V} + (0.5)(5\ \text{V}) = 1\ \text{V} + 2.5\ \text{V} = \mathbf{3.5\ V}$$

图 11.45(c) 中，方波的基线是 −1 V，幅度是 2 V，则平均值为：

$$V_{avg} = \text{基线值} + (\text{占空因数})(\text{幅度})$$
$$= -1\ \text{V} + (0.5)(2\ \text{V}) = -1\ \text{V} + 1\ \text{V} = \mathbf{0\ V}$$

正如交流正弦波一样，交流方波的平均值是零。

练习：如果图 11.45(a) 中波形的基线变为 1 V，则其平均值是多少？

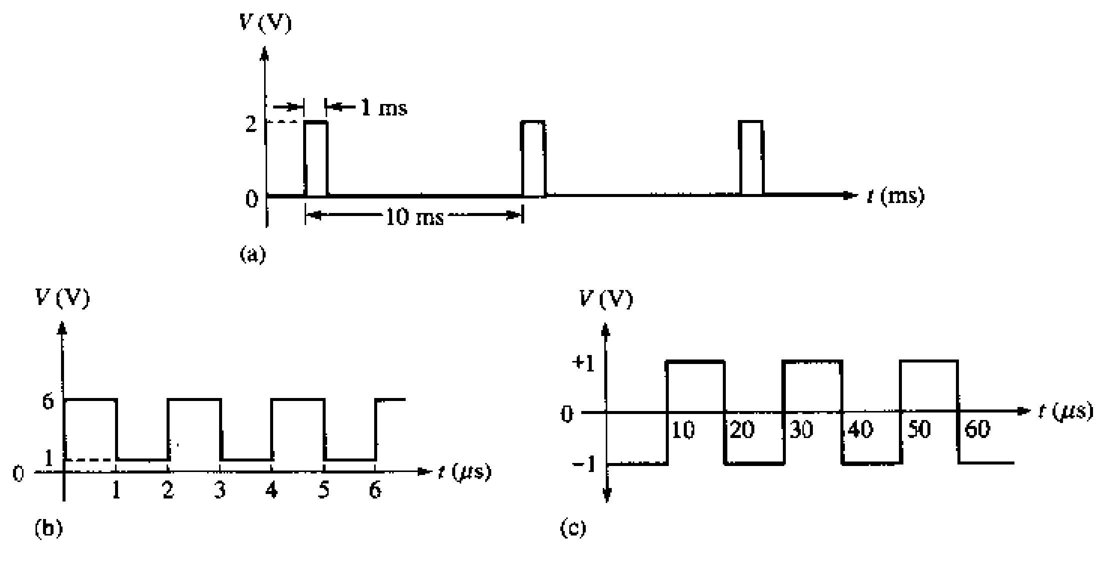


图 11.45

11.8.5 三角波和锯齿波

三角波和锯齿波由电压或电流的斜坡构成,斜坡是电压或电流的线性增加或减小。图 11.46(a)中显示了正向斜坡和反向斜坡。在图 11.46(a)中,斜坡的斜率是正的;在图 11.46(b)中,斜坡的斜率是负的。电压斜坡的斜率是 ± V/t,单位表示为 V/s;电流斜坡的斜率是 ± I/t,单位表示为 A/s。

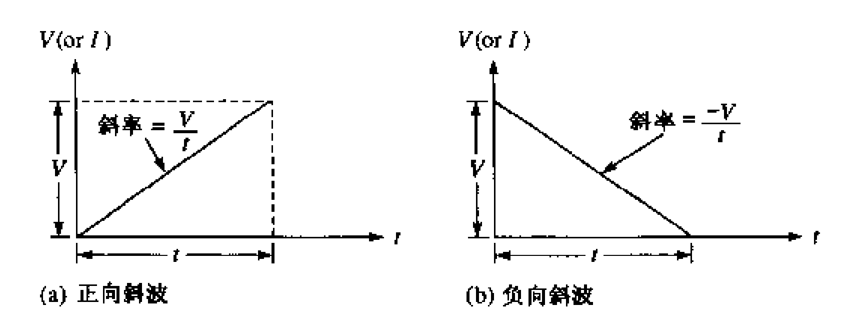


图 11.46 斜坡

例 11.16 图 11.47 中电压斜坡的斜率是多少?

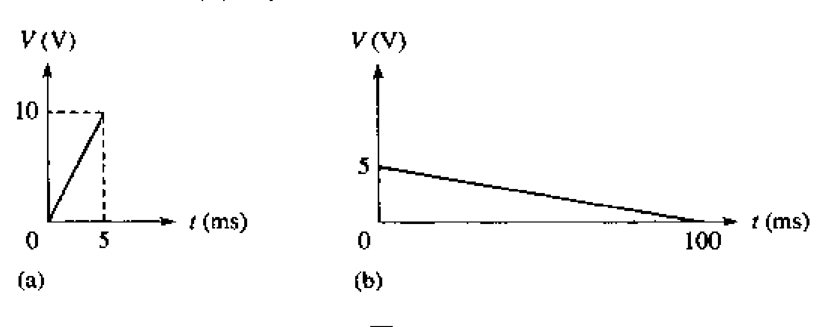


图 11.47

解:图 11.47(a)中,电压在 5 ms 内从 0 V 增加到 + 10 V。因此 $V = 10$ V, $t = 5$ ms,则斜率为:

$$\frac{V}{t} = \frac{10\ \text{V}}{5\ \text{ms}} = \mathbf{2\ V/ms = 2\ kV/s}$$

图 11.47(b)中，电压在 100 ms 内从 +5 V 减小到 0 V。因此 $V = -5\ \text{V}$，$t = 100\ \text{ms}$，则斜率为：

$$\frac{V}{t} = \frac{-5\ \text{V}}{100\ \text{ms}} = \mathbf{-0.05\ V/ms = -50\ V/s}$$

练习：某个电压斜坡的斜率是 +12 V/μs，如果斜波从零开始，则 0.01 ms 时电压是多少？

三角波　图 11.48 显示了三角波由具有相同斜率的正向斜坡和反向斜坡组成。如图中所示，这个波形的周期用从一个波峰到下一个对应波峰之间的时间来测量。这个特殊的三角波是交流的，并且平均值是零。

图 11.49 描绘了一个具有非零平均值的三角波，三角波频率的测定和正弦波频率的测定方法相同，为 $f = 1/T$。

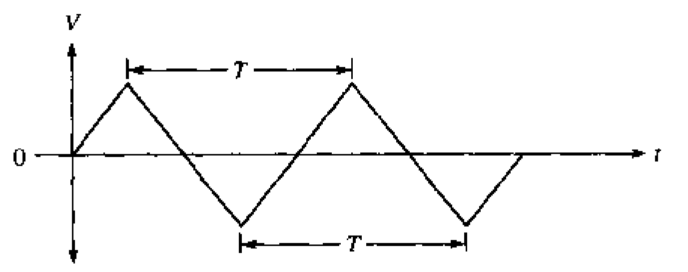


图 11.48　平均值为零的交流三角波

图 11.49　平均值不为零的非交流三角波

锯齿波　事实上，锯齿波是一种特殊情况的三角波，组成它的两个斜坡中，其中一个比另一个的持续时间长得多。锯齿波在许多电子学领域中得到应用。例如，电子束扫描电视接收机屏幕能产生图像，这里电子束是由锯齿电压或电流控制的。一个锯齿波产生水平束运动，另一个锯齿波产生垂直束运动。锯齿电压有时也称为扫描电压。

图 11.50 是锯齿波的一个例子，注意它由一个持续时间相对较长的正向斜坡，紧接着一个持续时间相对较短的反向斜坡组成。

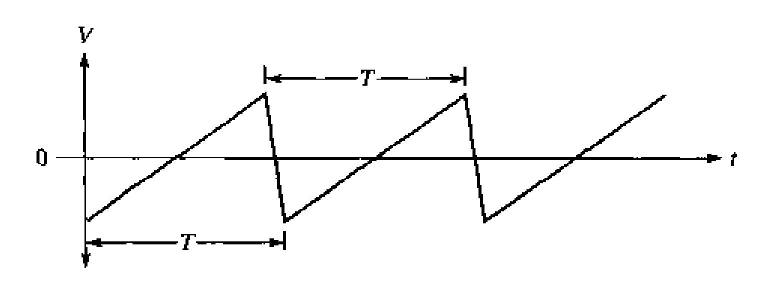


图 11.50　交流锯齿波

11.8.6　谐波

一个周期重复的非正弦波由一个基波频率和若干个谐波频率组成。基波频率指波形的重复频率，而谐波指拥有较高频率的正弦波，并且这些正弦波频率是基波的整数倍。

奇次谐波　奇次谐波的频率为波形基波频率的奇数倍。例如，频率为 1 kHz 的方波由频率为 1 kHz 的基波及频率为 3 kHz，5 kHz，7 kHz 等奇次谐波组成。既然这样，频率为 3 kHz 的谐波就叫做 3 次谐波；频率为 5 kHz 的谐波就叫做 5 次谐波，依次类推。

偶次谐波 偶次谐波的频率为波形基波频率的偶数倍。例如,某个波形的基波频率为200 Hz,则2次谐波的频率为400 Hz;4次谐波的频率为800 Hz;6次谐波的频率为1200 Hz,依次类推,这些都是偶次谐波。

复合波 因为纯粹正弦波发生的任何畸变都会产生谐波,因此非正弦波是由基波和若干个谐波复合而成的。一些类型的波形只有奇次谐波、一些类型的波形只有偶次谐波,而另外某些波形则二者都有。波形的斜率由其谐波的内容决定。但总的来说,只有基波和前面少数谐波在决定波形斜率时具有有效意义。

方波是只包含基波和奇次谐波的波形的一个例子。若基波和每个奇次谐波的瞬时值在每个点上代数相加,如图11.51所示,得到的曲线将包含方波的斜率。在图11.51(a)中,基波和3次谐波产生了一个波形,这个波形有些类似于一个方波;在图11.51(b)中,基波、3次谐波和5次谐波产生的波形比较类似于一个方波;如图11.51(c)所示,当包含7次谐波时,得到的波形更类似于一个方波;当包含更多的谐波时,一个周期性的方波就近似产生了。

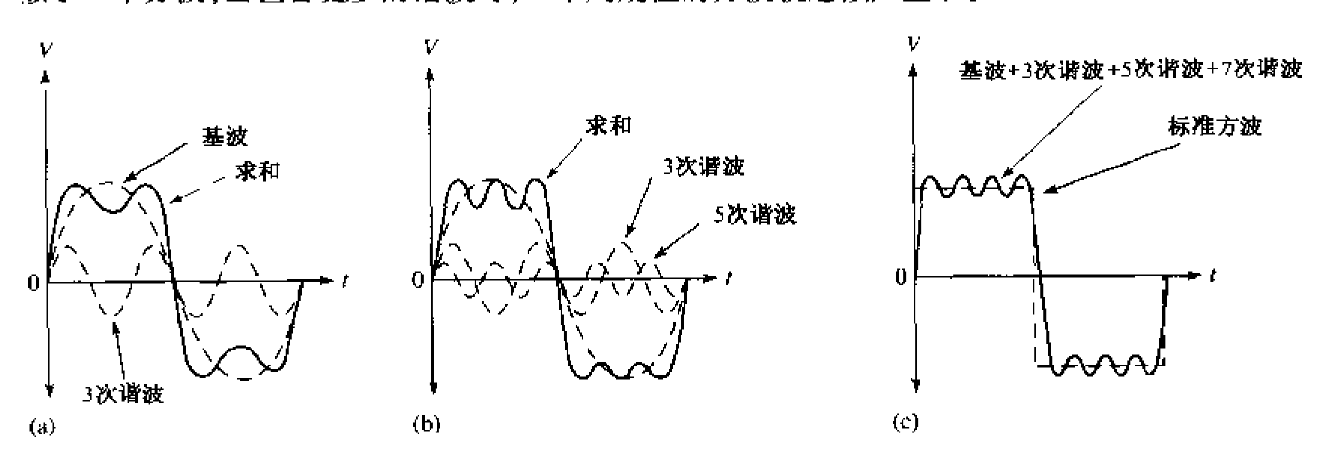


图11.51 奇次谐波产生的方波

11.8节练习

1. 确定下列参数:
   (a) 上升时间 (b) 下降时间 (c) 脉冲宽度
2. 在某个脉冲波形中,每1 ms出现一个脉冲,则这个波形的频率是多少?
3. 确定图11.52(a)中波形的占空因数、幅度和平均值。
4. 图11.52(b)中三角波的周期是多少?

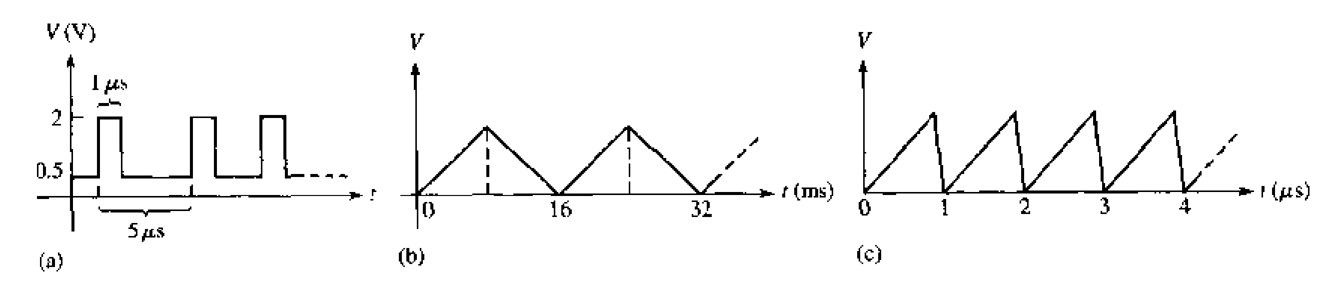


图11.52

5. 图11.52(c)中锯齿波的频率是多少?
6. 确定基波频率。

7. 基波频率为 1 kHz 时,2 次谐波是什么?

8. 周期为 10 μs 方波的基波频率是多少?

11.9 示波器

示波器是一种最常用的多功能测试仪器。示波器能在屏幕上显示随时间变化的实际电压波形,通过示波器可以测量波形并和其他波形相比较。

学完本节以后,读者应该能够:

- 用示波器测量波形
- 了解示波器的基本操作方法
- 学会怎样测量幅度
- 学会怎样测量频率和周期

图 11.53 显示了两种型号的示波器,图 11.53(a)显示的是数字示波器,图 11.53(b)显示的是模拟示波器。可以把示波器的本质想像为一个"绘图仪器",可以绘制出电压,并显示电压是如何随时间变化的。本章中所论述的正弦波波形只是电压随时间变化的曲线。然而,示波器能显示任何类型的波形,下面将以正弦波为例讲述示波器的基本概念。



(a) 数字示波器　　(b) 模拟示波器

图 11.53　示波器(图片的使用经 B&K Precision Corp. 许可)

数字示波器和模拟示波器的区别在于对输入信号进行预处理的方式不同,处理后的信号将显示在阴极射线管(CRT,cathode ray tube)的显示屏上。对两种示波器而言,前部面板的主要操作装置基本上是一样的;然而,数字示波器总的来说能比模拟示波器做更多的自动化处理。

数字示波器对信号电压进行取样,然后用一个模-数转换器把待测电压转换成数字信息,接着数字信息在显示屏上重现波形。

模拟示波器通过把待测信号电压作用于电子束来工作,被测电压使电子束向上或向下根据电压值的大小发生偏转,并立刻在显示屏上描绘出波形。

尽管模拟示波器仍在生产,并且许多型号较老的模拟示波器仍在使用,但数字示波器在广泛使用,并逐步成为模拟示波器的取代产品。

11.9.1 数字示波器

图 11.54 显示了一个典型的双路数字示波器的前部面板视图。仪器的区别在于型号和生产厂商的不同,但大部分都有较大程度的共同点。注意,两个垂直轴部分和一个水平轴部分都包括一个位置操作旋钮、一个通道菜单键和一个 Volts/Div 或 Sec/Div 操作旋钮。大部分数字示波器都有自动测量、菜单选择、参数设置的屏幕显示等,是模拟示波器所没有的。

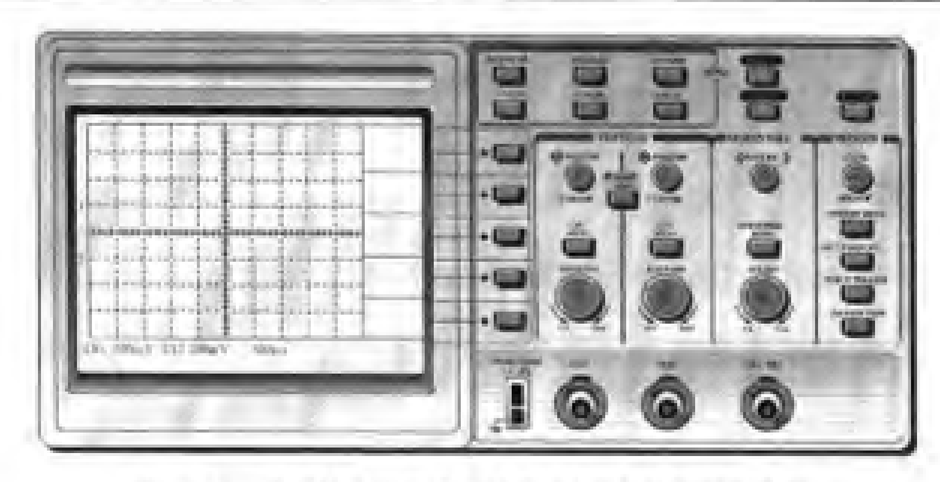


图 11.54 典型的双路数字示波器(屏幕上的数字不确定)

以下将讨论一些操作旋钮,使使用者对自己实际拥有的特定示波器的细节有完整的了解。

在垂直轴中,两个通道(CH1 和 CH2)都有完全相同的操作旋钮。位置操作旋钮可以在显示屏上使波形的位置垂直地上下移动。通道菜单键提供了几种屏幕显示的项目选择,例如耦合(直流、交流或者地线);Volts/Div 的系列值或者细微调节;探针衰减(例如 1×,10×);及其他一些参数。Volts/Div 操作旋钮用来调整屏幕上纵向每格所代表的电压数。对这种类型的示波器,每个通道 Volts/Div 的设置都在屏幕上显示,而不用像许多模拟示波器那样必须从刻度盘设置上来读取。数学菜单键提供了对输入波形进行处理的方式选择,例如减法、加法及反向。

在水平轴中,操作旋钮对两个通道同时作用。位置操作旋钮可以使我们在显示屏上水平地左右移动所显示波形的位置。水平菜单键提供了几种屏幕显示的项目选择,例如主时基,用于扩展波形某一部分的图像;及其他一些参数。Sec/Div 控制旋钮用来调整屏幕上横向每格所代表的时间或主时基。对这种类型的示波器,Sec/Div 的设置都在屏幕上显示,而不用像许多模拟示波器那样必须从刻度盘设置上来读取。

在触发器部分中,电平操作旋钮确定触发波形上的点。在这个点上,触发开始用以启动对输入通道波形的显示扫描。触发菜单键提供了几种屏幕显示的项目选择,包括边缘或者斜坡触发、触发源、触发模式及其他一些参数。

前部面板上有 4 个输入连接器,两个标着 CH1 和 CH2 的连接器连接电压探头,用于输入在屏幕上显示的信号;"EXT TRIG"连接器用于连接外部触发源;探头校正器用于使电压探头电力匹配于输入电路。

探头衰减 所有示波器探头都有衰减功能,用于指示衰减输入信号的多少。1×探头一点也不衰减输入信号,然1而10×探头10倍系数衰减输入信号。衰减系数越大,测试时示波器的负载电流越小,负载电流越小意味着更高的精度。用电压探头测试电路中的电压时,应该经常确认探头和示波器在衰减因数项目上是否兼容,这可以通过纵轴部分的通道菜单来选择正确的探头衰减以匹配探头。例如,如果使用 10×探头,菜单上应该选择 10×衰减。

探头补偿 如果没有正确地补偿探头,探头会使波形失真。示波器应该总是在波形附着的第一时间被补偿,并且应该周期性地检查补偿。示波器上探头校正器的输出提供了一个精确的波形以检查补偿。

如图 11.55 所示,探头的连接器应该连接在通道输入(CH1 或者 CH2)上;探头尖应该连接在探头校正器的输出上;同时,探头的地线应该连接在探头校正器的接地管脚上。补偿波形将显

示在屏幕上，如图 11.56(a)所示，补偿波形有三种情况。如果波形是不完全补偿，或者是过度补偿，探头必须像图 11.56(b)中指示的那样校准，直到被正确补偿。

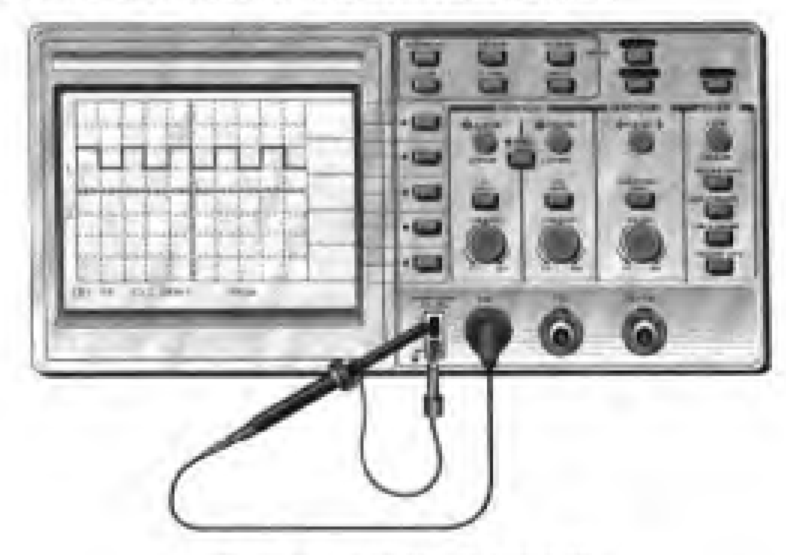


图 11.55　电压探头补偿的连接

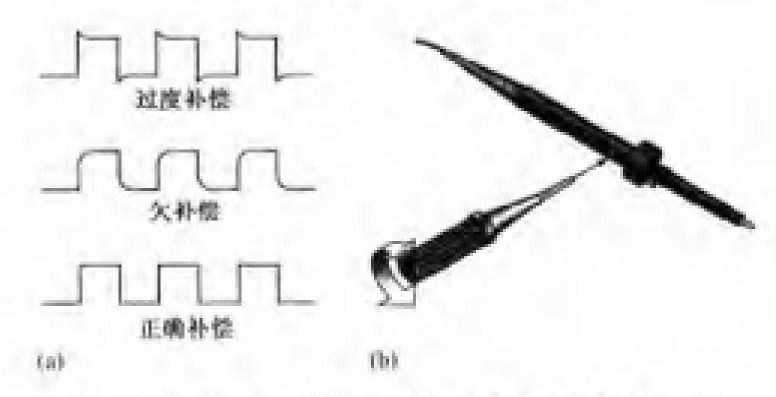


图 11.56　波形的补偿和典型的电压探头校准

例 11.17　确定图 11.57 中数字示波器屏幕上显示的正弦波的峰－峰值和周期，Volts/Div 和 Sec/Div 的设置显示在屏幕下方。

解：看图 11.57(a)中的垂直刻度：

$$V_{pp} = 6\text{ 格} \times 0.5\text{ V/格} = \mathbf{3.0\ V}$$

从水平刻度(一个周期占了 10 个格)：

$$T = 10\text{ 格} \times 2\text{ ms/格} = \mathbf{20\ ms}$$

看图 11.57(b)中的垂直刻度：

$$V_{pp} = 5\text{ 格} \times 50\text{ mV/格} = \mathbf{250\ mV}$$

从水平刻度(一个周期占了 6 个格)：

$$T = 6\text{ 格} \times 0.1\text{ ms/格} = 0.6\text{ ms} = \mathbf{600\ \mu s}$$

看图 11.57(c)中的垂直刻度，正弦波垂直居中：

$$V_{pp} = 6.8\text{ 格} \times 2\text{ V/格} = \mathbf{13.6\ V}$$

从水平刻度(半个周期占了 10 个格)：

$$T = 20\text{ 格} \times 10\ \mu\text{s/格} = \mathbf{200\ \mu s}$$

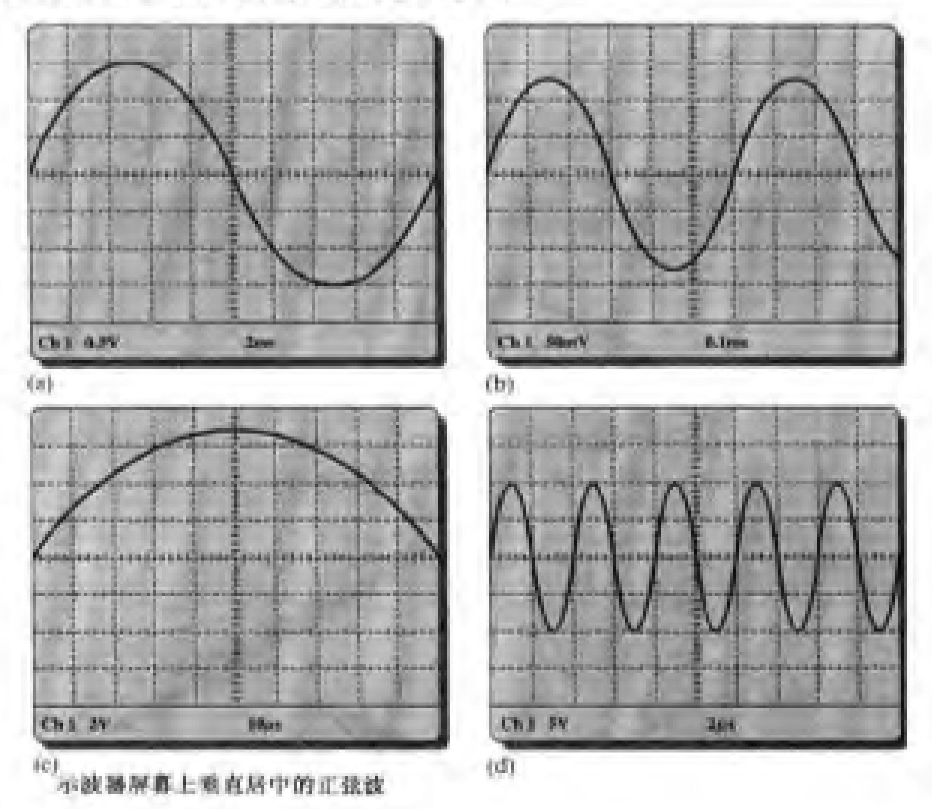
看图 11.57(d)中的垂直刻度：

$$V_p = 4\text{ 格} \times 5\text{ V/格} = 20\text{ V}$$

从水平刻度(一个周期占了两个格):

$$T = 2\text{ 格} \times 2\ \mu\text{s/格} = 4\ \mu\text{s}$$

练习:确定图 11.57 所示每个波形的均方根值和频率。



(a)　(b)　(c) 示波器屏幕上垂直居中的正弦波　(d)

图 11.57

11.9.2 模拟示波器

图 11.58 显示了一个典型模拟示波器的常见前部面板视图。上面有两个 Volts/Div 操作旋钮,每个旋钮对应一个通道,这些旋钮确定信号的衰减或者放大。刻度盘上的每个设置指示了屏幕上每一纵格所代表的伏特(V)或者毫伏(mV)。典型地,Volts/Div 刻度盘上有两个括号,一个对应 10 倍(10×)电压探头,一个对应 1 倍(1×)电压探头。最常用的探头是 10×,它 10 倍衰减输入信号,使电路上的负载效应减小。使用 10× 探头时,必须读 10× 括号中的 Volts/Div 设置。

时基控制旋钮或者 Sec/Div 控制旋钮设置秒(s)、毫秒(ms)或者微秒(μs)的数值,表示每格为刻度盘上指示的数值。可以在横坐标上测量一个波形的周期,然后计算频率。



图 11.58　典型的双路模拟示波器

例 11.18 基于控制旋钮刻度盘上的设置，确定图 11.59 所示模拟示波器屏幕上波形的峰 - 峰值振幅和周期，并计算频率。假定使用的是 10× 探针。

解：Volts/Div 设置为 1 V，正弦波从负波谷到正波峰的高为 6 个格。同时，因为每个格表示 1 V，因此正弦波的峰 - 峰值为：

$$\text{振幅} = (6\text{ 个格})(1\text{ V/格}) = \mathbf{6\ V}$$

Sec/Div 设置为 10 μs，波形的整个周期覆盖了 10 个格。因此，周期为：

$$\text{周期} = (10\text{ 个格})(10\ \mu\text{s/格}) = \mathbf{100\ \mu s}$$

频率计算如下：

$$f = \frac{1}{100\ \mu\text{s}} = \mathbf{10\ kHz}$$

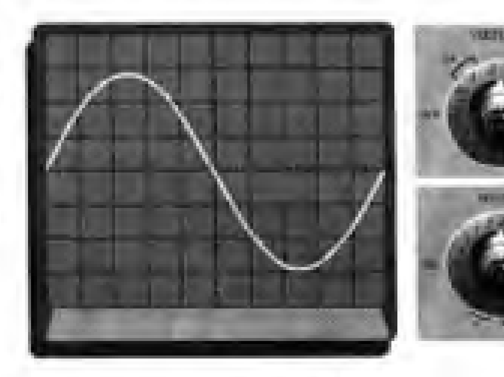


图 11.59

练习：对 Volts/Div 设置为 5 V，Sec/Div 设置为 2 ms，确定图 11.59 所示屏幕上正弦波的峰值、周期和频率。

其他基本控制旋钮 下面的描述参考了图 11.58 中的模拟示波器。虽然其中的大多数对数字示波器也很常见，但数字示波器是用菜单驱动方式确定其功能的。

亮度 亮度操作旋钮用来改变屏幕上扫描线的亮度，但需要注意亮度不要长时间设置得太高，特别是电子束在屏幕上形成了一个不动的亮点时。

聚焦 这个控制旋钮用来聚焦电子束，从而在屏幕上聚合为一个微小的点。散焦状态的结果为一条模糊的轨迹线。

横向和纵向位置旋钮 这些控制旋钮用来在屏幕上水平或者上下移动轨迹线，以便更容易地观察或者测量。

交流 - 地线 - 直流开关 这个开关允许输入信号交流耦合、直流耦合或者接地。交流耦合通过插入一个电容器和信号串联来消除输入信号上的任何直流成分。直流耦合允许直流值进行显示。接地位置不连接输入，同时允许在屏幕上建立 0 V 参照。对数字信号，应该用直流耦合。

信号输入 需要显示的信号电压连接在通道 1(CH1)和/或者通道 2(CH2)上。正如前面所提到的，这些输入连接是通过衰减探头进行的，衰减探头用来使待测电路上示波器的负载效应最小化。示波器探头的常用方式为把信号电压衰减 10 倍因子，因此称为 10 倍(10×)探头。测量非常小的电压时，有时也使用 1(1×)倍探头；它们在较高频率的电压测量时损失了精度，提供一个或两个输入信号同时显示在屏幕上，使实验电路的负载加重。

模式开关 这些开关为通道 2 信号的反向(Invert)，两个输入信号的相加(Add)及在扫描中交替(Alt)和切换(Chop)两种模式之间的选择。通常来说，频率高于 100 Hz 时选择 Alt，否则用 Chop。

触发操作旋钮 触发操作旋钮允许示波器选定从不同的源进行触发。触发用来使扫描线在屏幕上开始扫描。触发可以从内部信号、外部信号或者线性电压发生。典型的触发模式为普通、自动、单扫和时变。自动模式中，在缺少适当的触发信号时，使扫描产生。普通模式中，为使扫描产生，触发信号必须存在。时变模式中，允许通过在触发电路中放置一个低通滤波器，以便在时变域或者时变线性信号上发生稳定触发。斜坡开关用来设置触发器，以便使触发或者在触发波形的正向斜坡发生，或者在触发波形的负向斜坡发生。电平操作旋钮用来在触发信号上选择电压电平，在选定的电平上触发发生。简单而言，触发操作旋钮为示波器中的波形和输入

信号的水平扫描提供了同步。能在屏幕上输入信号的显示是稳定的，比图 11.60 所示的出现漂移要好。

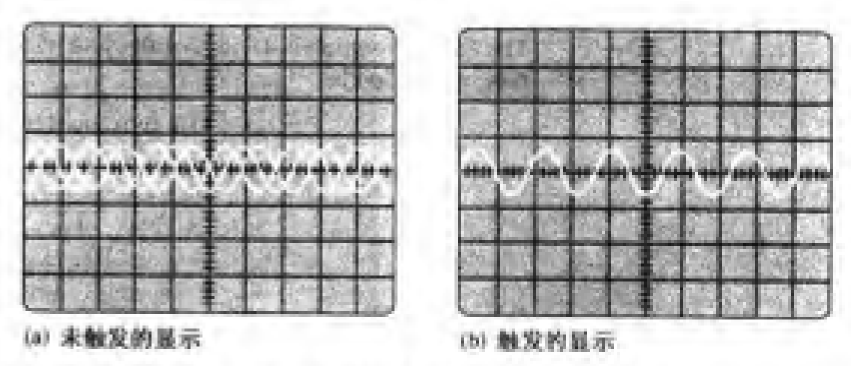


图 11.60 适当的触发使重复的波形稳定

11.9 节练习

1. 解释模拟示波器和数字示波器之间的主要区别。
2. 在示波器上，能在屏幕上测量电压(水平，垂直)和时间(水平，垂直)。
3. 示波器能完成哪些万用表不能完成的测量?
4. 测量时，什么时候应该选择 10× 探头?

技术实践

正如本章中所学的一样，非正弦波由许多不同频率的谐波组合而成，其中每一个谐波都是具有确定频率的正弦波。如果一个确定的正弦频率的频率范围在 300 Hz 到 15 kHz 之间，是可以听见的，也就是说能被人耳听到。一个单独的可听见的频率，或者纯正弦波称为单音。当通过扬声器听到一个重现的单音时，响度或者音量是由其电压幅度决定的。可以用有关正弦波性质的知识，通过示波器来测量无线接收机中不同点上信号的频率和幅度。

实际上，由无线接收机接收的声音或者音乐信号包含许多谐波频率，并且有不同的电压值。声音或者音乐信号是连续变化的，因此其谐波成分也是变化的。然而，如果一个单独的正弦波通过传输，并被接收机接收，从扬声器中会听到一个不变的音调。

对此虽然没有详细介绍放大器和接收系统的背景，但是可以观测到接收机在不同点上的信号。典型 AM 接收机的块图如图 11.61 所示。AM 代表幅度调制，这个主题将在以后介绍。图 11.62 显示了一个基本 AM 信号，现在只需要了解这些。正如所看到的那样，正弦波形的幅度是在变化的。较高射频(RF)信号称为载波，它的幅度被一个较低频率的信号(本例中是一个单音)改变或者称为调制。然而，音频信号通常是一个复杂的声音或音乐波形。

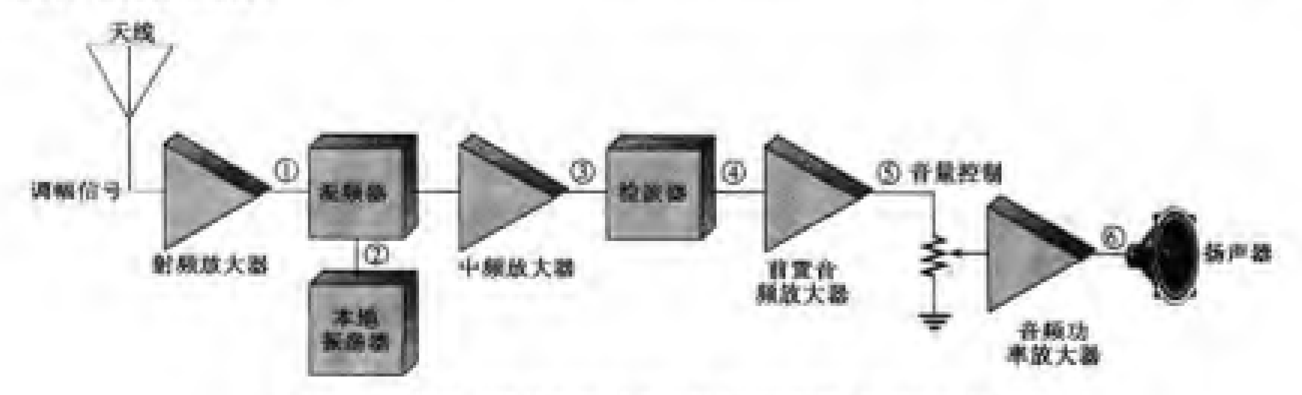


图 11.61 简单无线接收机的简化块图(圆圈数字代表测试点)

示波器测量

图 11.61 接收机块图中，测试点上用圆圈数字所表示的信号用图 11.63 中的示波器来测量，示波器通道上标有对应的圆圈数字。在所有情况下，屏幕中上面的波形是 1 通道，下面的波形是 2 通道。屏幕底部左边的读数是 1 通道的，右边的读数是 2 通道的。

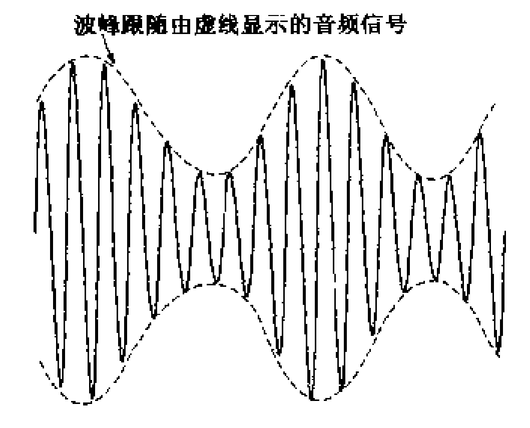


图 11.62　幅度调制信号(AM)举例

点 1 上的信号是 AM 信号，但因为时间基数太小，看不到幅度的变化。也就是说波形拉得太开，以至于不能看到幅度变化的调制音频的信号，所以看到载波的一个周期。在点 3 上，较高的载波频率很难测定，因为选定的时间基数是为了允许显示调制信号的一个完整周期。在 AM 接收机中，这个中心频率是 455 kHz。在实践中，在示波器上不容易观察点 3 上被调制的载波信号。因为包含两个频率，所以很难同步以获得一个稳定的模式。有时利用外部触发获得稳定显示。在这种情况下可以显示一个稳定模式来举例说明被调制波形。

■ 图 11.63 中，除点 3 外其余每一点的波形都有确定的频率和均方根值。点 4 上的信号是从较高中心频率(455 kHz)解调后的调制单音。

放大器分析

■ 所有的电压放大器都有一个特性 - 电压增益。电压增益是指输出信号幅度与输入信号幅度之比。通过这个定义和示波器测量，确定这个特定接收机中音频前置放大器的增益。

■ 电信号通过扬声器转换为声音时，声音的响度由输入扬声器的信号的幅度决定。我们基于这一点，解释音量控制电位计怎样用来调整声音的响度，并确定扬声器上电压的均方根值。

技术实践练习

1. RF 代表什么？
2. IF 代表什么？
3. 载波和音频哪个频率更高？
4. 给定 AM 信号中的变量是什么？

小结

■ 正弦波是随时间变化的周期性波形。
■ 交流电流的方向随信号源电压极性的改变而改变。
■ 交流正弦波的一个周期包括正半周和负半周。
■ 正弦波信号源的两种一般形式为电磁交流发生器和电子振荡电路。
■ 正弦波的一个完整周期是 360°或 2π 弧度；半个周期是 180°或 π 弧度；四分之一个周期是 90°或 π/2 弧度。
■ 可以采用导体在磁场中旋转的方式产生正弦电压。
■ 相角是给定正弦波和参考正弦波之间在度或者弧度方面的不同。
■ 脉冲由两个跃变组成，首先从基线电平跃变到一定电平，接着再跃变回基线电平。
■ 三角波或锯齿波由正向斜坡和反向斜坡组成。
■ 谐波频率是非正弦波形重复频率的奇次倍或者偶次倍。
■ 表 11.2 总结了正弦波参数值之间的转换。

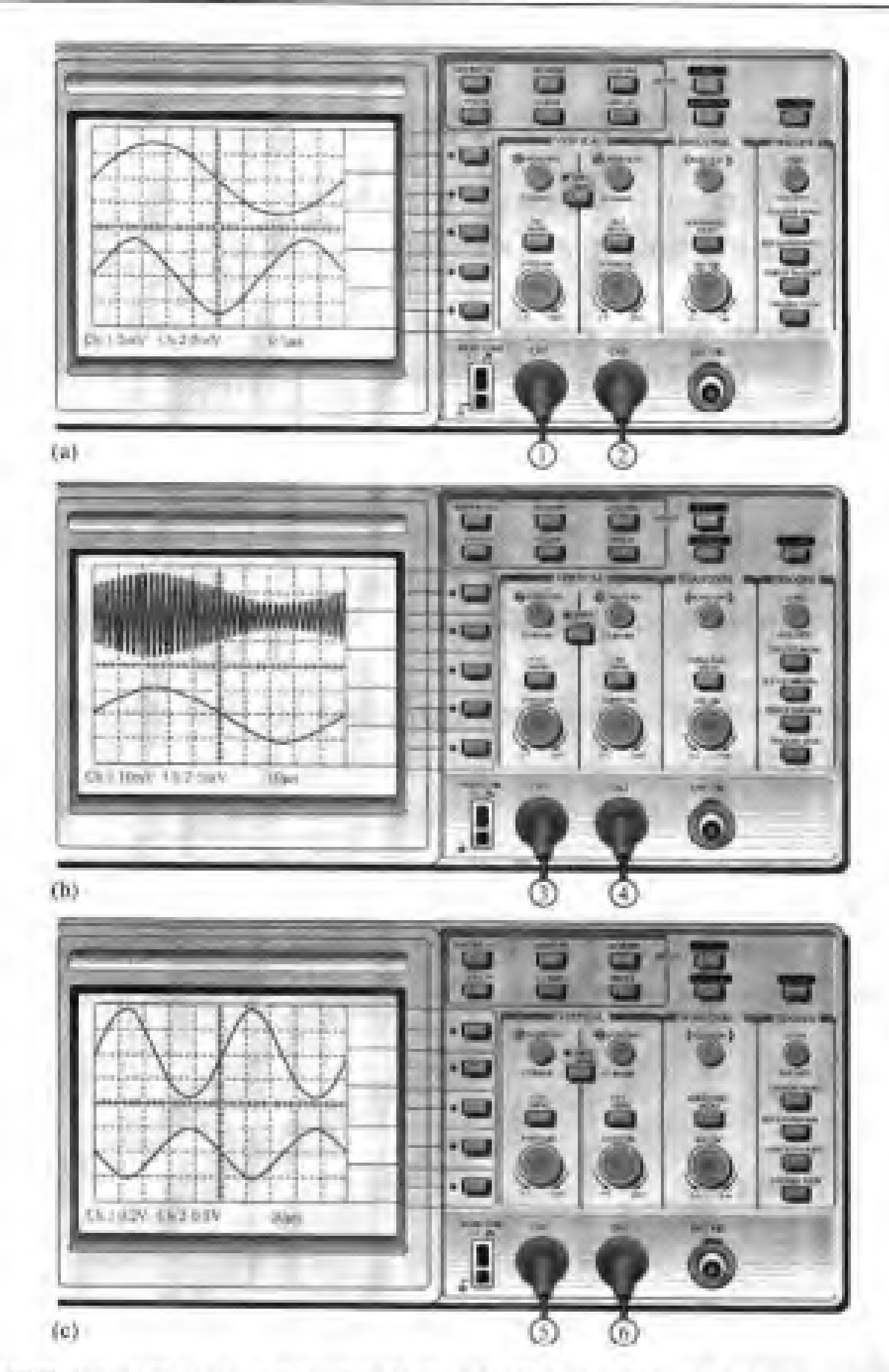


图 11.63 圆圈数字对应图 11.61 中标注数字的测试点(简化示波器屏幕形式以强调波形和测量结果)

表 11.2

转换值	转换结果	转换倍率
峰值	均方根值	0.707
峰值	峰-峰值	2
峰值	平均值	0.637
均方根值	峰值	1.414
峰-峰值	峰值	0.5
平均值	峰值	1.57

主要术语

交流电流(ac):信号源电压极性的改变,电流方向发生翻转。

幅度(A):电压或电流的最大值。

平均值:正弦波的平均值指半个周期内的平均值,是 0.637 倍的峰值。

循环:周期性波形的一次重复。

度:对应于一个完整周期的 1/360 的角度测量单位。

占空因数:脉冲波形的一个特性,用来表示在一个周期内脉冲所占时间的百分数,脉冲宽度对时间的比率表示为分数或者百分数。

下降时间(t_f):脉冲从幅度的 90%下降到幅度的 10%所需要的时间间隔。

频率(f):计量周期函数的变化率;1 s 内完成周期的数目,频率的单位是赫兹。

基波频率:波形的重复率。

谐波:复合波形所包含的各个频率分量,其频率是脉冲重复频率(基波频率)的整数倍。

赫兹(Hz):频率的单位,1 赫兹等于 1 周期每秒。

瞬时值:在给定的时间瞬时,波形的电压值或电流值。

振荡器:产生随时间变化信号的电子电路,不需要外部输入信号,而采用正反馈的方法。

示波器:在屏幕上显示信号波形的一种测量仪器。

峰-峰值:波形上计量从最小值点到最大值点的电压值或电流值。

峰值:电压或电流波形正向最大值或负向最大值。

周期(T):周期性波形完成一个完整循环所需要的时间间隔。

周期性:在固定时间间隔内重复的性质。

相位:表示随时间变化出现的波形与参照物之间的相对角位移。

脉冲:在时间域中,由两个大小相等,方向相反的梯形组成的电压或电流。

脉冲宽度(t_W):对于理想脉冲两个方向相反的梯形之间的时间间隔;对非理想脉冲,指前沿上幅度 50%的点和后沿上幅度 50%的点之间的时间间隔。

弧度:角度的测量单位。一个完整的 360°。圆周有 2π 弧度,1 弧度等于 57.3°。

斜坡:用来表示波形的一种特性,指电压或电流线性增加或线性减小。

上升时间(t_r):脉冲从幅度的 10%上升到幅度的 90%所需要的时间间隔。

均方根值:表明正弦电压热效应的值,同时也指正弦电压的有效值。均方根值等于 0.707 倍的峰值,rms 代表均方根。

正弦波:一种波形,遵循由公式 $y = A\sin\theta$ 定义的周期性正弦模式。

波形:变化的图形,显示电压或电流量怎样随时间变化。

公式

11.1	$f = \frac{1}{T}$	频率
11.2	$T = \frac{1}{f}$	周期
11.3	$f = (\text{磁极对数})(\text{rps})$	振荡器输出频率
11.4	$V_{pp} = 2V_p$	峰-峰值电压(正弦波)
11.5	$I_{pp} = 2I_p$	峰-峰值电流(正弦波)
11.6	$V_{rms} = 0.707V_p$	均方根电压(正弦波)
11.7	$I_{rms} = 0.707I_p$	均方根电流(正弦波)

11.8 $V_p = 1.414 V_{rms}$ 峰值电压(正弦波)

11.9 $I_p = 1.414 I_{rms}$ 峰值电流(正弦波)

11.10 $V_{pp} = 2.828 V_{rms}$ 峰-峰值电压(正弦波)

11.11 $I_{pp} = 2.828 I_{rms}$ 峰-峰值电流(正弦波)

11.12 $V_{avg} = 0.637 V_p$ 半周期平均值电压(正弦波)

11.13 $I_{avg} = 0.637 I_p$ 半周期平均值电压(正弦波)

11.14 $弧度 = \left(\frac{\pi 弧度}{180°}\right) \times 度$

11.15 $度 = \left(\frac{180°}{\pi 弧度}\right) \times 弧度$

11.16 $y = A\sin\theta$ 正弦波的一般公式

11.17 $y = A\sin(\theta - \phi)$ 正弦波滞后参考位置

11.18 $y = A\sin(\theta + \phi)$ 正弦波超前参考位置

11.19 $占空比 = \left(\frac{t_W}{T}\right)100\%$

11.20 $V_{avg} = 基线值 + (占空因数)(幅度)$ 脉冲波形的平均值

自测题

1. 交流电流(ac)和直流电流(dc)的不同之处在于____:
   (a) ac 改变数值,dc 不改变数值 (b) ac 改变方向,dc 不改变方向
   (c) (a)(b)两个答案都对 (d) (a)(b)两个答案都不对
2. 在每个周期中,正弦波达到峰值____:
   (a) 一次 (b) 两次 (c) 四次 (d) 由频率决定的许多次
3. 频率为 12 kHz 的正弦波比频率为 12 kHz 的正弦波改变速率快:
   (a) 20 kHz (b) 15 000 Hz (c) 10 000 Hz (d) 1.25 MHz
4. 周期为 2 ms 的正弦波比周期为 2 ms 的正弦波改变速率快:
   (a) 1 ms (b) 0.0025 s (c) 1.5 ms (d) 1200 ms
5. 正弦波的频率为 60 Hz 时,在 10 s 内会经过____:
   (a) 6 个周期 (b) 10 个周期 (c) 1/16 个周期 (d) 600 个周期
6. 如果正弦波的峰值是 10 V,峰-峰值是____:
   (a) 20 V (b) 5 V (c) 100 V (d) 以上都不是
7. 如果正弦波的峰值是 20 V,均方根值是:
   (a) 14.14 V (b) 6.37 V (c) 7.07 V (d) 0.707 V
8. 对于峰值为 10 V 的正弦波,一个完整周期的平均值是____:
   (a) 0 V (b) 6.37 V (c) 7.07 V (d) 5 V
9. 对于峰值为 20 V 的正弦波,半周期平均值是____:
   (a) 0 V (b) 6.37 V (c) 12.74 V (d) 14.14 V
10. 一个正弦波在 10°上有正向过零点,另一个正弦波在 45°上有正向过零点,那么两个波形之间的相位差是____:
    (a) 55° (b) 35° (c) 0° (d) 以上都不是
11. 峰值为 15 A 的正弦波在正向零相交位置 32°点的瞬时值是____:
    (a) 7.95 A (b) 7.5 A (c) 2.13 A (d) 7.95 V
12. 如果流过 10 kΩ 电阻的均方根电流是 5 mA,电阻两端的均方根电压降是____:
    (a) 70.7 V (b) 7.07 V (c) 5 V (d) 50 V

13. 两个串联电阻连接在一个交流源上，如果一个电阻两端有 6.5 V 的均方根电压，而另一个电阻两端有 3.2 V 的均方根电压，那么电源电压的峰值是___：
   (a) 9.7 V　(b) 9.19 V　(c) 13.72 V　(d) 4.53 V
14. 一个 10 kHz 的脉冲波形包含 10 μs 宽度的脉冲，其占空因数为___：
   (a) 100%　(b) 10%　(c) 1 %　(d) 不确定
15. 方波的占空因数____：
   (a) 随频率不同　(b) 随脉冲宽度不同　(c) (a)(b)两个答案都对　(d) 是 50%

故障检修测验

参见图 11.66

1. 如果电源电压增加，则 R_3 两端的电压____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变
2. 如果 R_4 断开，则 R_3 两端的电压____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变
3. 如果电源电压的半周期平均值减小，则 R_2 两端的均方根电压___：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变

参见图 11.68

4. 如果直流电压减小，则流过 R_L 的平均电流____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变
5. 如果直流电压源反向，则流过 R_L 的均方根电流____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变

参考图 11.77

6. 如果面包板上左上的电阻用蓝、灰、棕、金色环代替图示色环，则示波器 CH2 通道的电压测量____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变
7. 如果图示连接电阻右边的 CH2 通道探针移到电阻的左边，则被测电压的幅度____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变
8. 如果最右边电阻的底部管角是断开的，则 CH2 电压____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变
9. 如果连接上边两个电阻的导线是断开的，以至改变了输入信号源上的负载效应，则 CH1 电压____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变

参见图 11.78

10. 如果最右边电阻的第 3 条色环由红色变为橙色，则 CH1 电压___：
   (a) 增加　(b)减小　(c) 保持不变
11. 如果左上的电阻断开，则 CH1 电压____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变
12. 如果左下的电阻断开，则 CH1 电压____：
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 保持不变

习题(标有 * 的习题难度较大，奇数习题的答案在本书的末尾)

11.1 节　正弦波

1. 对下面每个周期的数值计算频率：
   (a) 1 s　(b) 0.2 s　(c) 50 ms　(d) 1 ms　(e) 500 μs　(f) 10 μs

2. 对下面每个频率的数值计算周期：

(a) 1 Hz (b) 60 Hz (c) 500 Hz (d) 1 kHz (e) 200 kHz (f) 5 MHz

3. 一个正弦波在 10 μs 内经过 5 个循环,周期是多少?

4. 一个正弦波的频率为 50 kHz,在 10 ms 内能完成多少次循环?

11.2 节 正弦电压源

5. 一台简单的两极,单相发生器中,转子上的导线圈以 250 rps 的速率旋转,则感应产生的输出电压频率是多少?

6. 某台四极发生器的旋转速率为 3600 rpm,则这台发生器产生的电压的频率是多少?

7. 四极发生器必须在什么样的旋转速率下才能产生 400 Hz 的正弦电压?

11.3 节 正弦波的电压值和电流值

8. 一个正弦波的峰值为 12 V,确定下列值：

(a) 均方根值 (b) 峰-峰值 (c) 平均值

9. 一个正弦电流的均方根值为 5 mA,确定下列值：

(a) 峰值 (b) 平均值 (c) 峰-峰值

10. 对图 11.64 所示的正弦波,确定峰值、峰-峰值、均方根值和平均值。

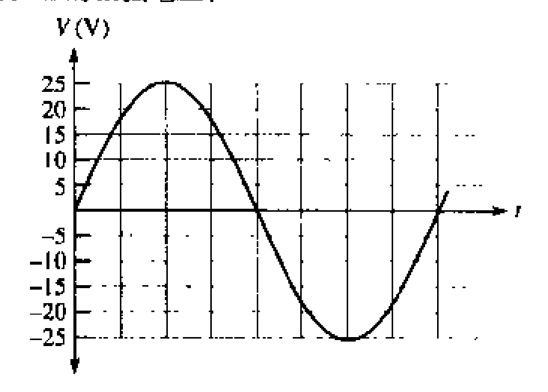


图 11.64

11.4 节 正弦波的角度测量

11. 把下列角度值从度转换为弧度：

(a) 30° (b) 45° (c) 78° (d) 135° (e) 200° (f) 300°

12. 把下列角度值从弧度转换为度：

(a) $\pi/8$ 弧度 (b) $\pi/3$ 弧度 (c) $\pi/2$ 弧度

(d) $3\pi/5$ 弧度 (e) $6\pi/5$ 弧度 (f) 1.8π 弧度

13. 正弦波 A 在 30°位置有正向零相交,正弦波 B 在 45°位置有正向零相交。确定这两个信号之间的相角,并指出哪个信号超前。

14. 一个正弦波在 75°位置有正波峰,另一个正弦波在 100°位置有正波峰。每个正弦波从零参照位置移动的相位是多少?二者之间的相角是多少?

15. 画一张包含两个正弦波的草图,要求正弦波 A 作为参照物,正弦波 B 滞后正弦波 A 90°,并且二者有相同的振幅。

11.5 节 正弦波公式

16. 某个正弦波在 0°位置有正向过零点,并且均方根值为 20 V,计算在下面每个角度上的瞬时值：

(a) 15° (b) 33° (c) 50° (d) 110° (e) 70° (f) 145° (g) 250° (h) 325°

17. 对于初相为 0°的正弦电流,峰值为 100 mA,确定在下列每一点上的瞬时值：

(a) 35° (b) 95° (c) 190° (d) 215° (e) 275° (f) 360°

18. 对均方根值为 6.37 V 和初相为 0°的正弦波,确定在下列每一点上的瞬时值：

(a) $\pi/8$ 弧度 (b) $\pi/4$ 弧度 (c) $\pi/2$ 弧度 (d) $3\pi/4$ 弧度

(e) π 弧度 (f) $3\pi/2$ 弧度 (g) 2π 弧度

19. 正弦波 A 滞后正弦波 B 30°,同时二者的峰值都是 15 V。正弦波 A 作为参照,并且在 0°位置有正向过零点,确定正弦波 B 在 30°,45°,90°,180°,200°和 300°位置的瞬时值。

20. 当正弦波 A 超前正弦波 B 30°时,重做习题 19。

*21. 某个正弦波的频率为 2.2 kHz,均方根值为 25 V。假定该正弦波在 $t = 0$ s 时为正向相交,那么从 0.12 ms 到 0.2 ms 电压改变了多少?

11.6 节　交流电路中的欧姆定律和基尔霍夫定律

22. 一个正弦电压作用于图 11.65 所示的电阻电路，确定下列值：

(a) I_{rms}　(b) I_{avg}　(c) I_p

(d) I_{pp}　(e) 在正波峰位置的 i

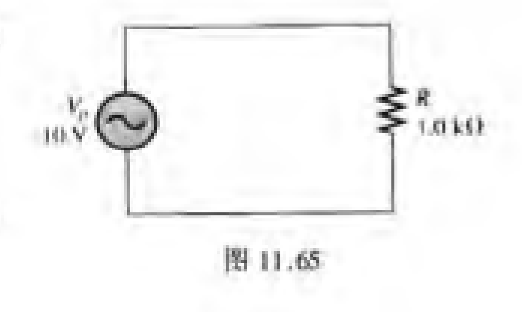


图 11.65

23. 找出图 11.66 中 R_1 和 R_2 两端电压的半周期平均值，图中所有数值均为均方根值。

24. 确定图 11.67 中 R_3 两端的均方根电压。

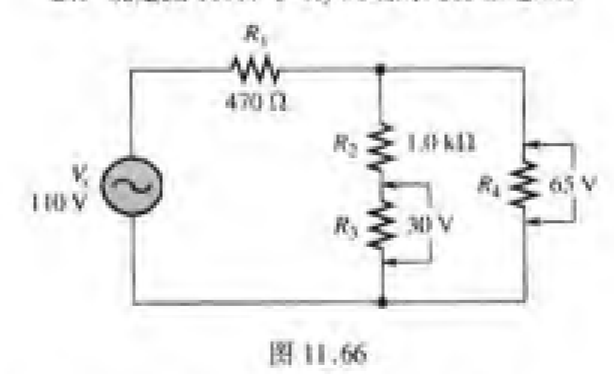


图 11.66

图 11.67

11.7 节　直流电压和交流电压的叠加

25. 均方根值为 10.6 V 的正弦波叠加于 24 V 的直流电平上，所得到波形的最大值和最小值分别是多少？

26. 正弦波的均方根值为 3 V，需要叠加多少伏特的直流电压能使叠加后的电压最小值为非交变向的(无负值)？

27. 峰值为 6 V 的正弦波叠加于 8 V 的直流电压上。如果直流电压降低到 5 V，该正弦波何时出现负值？

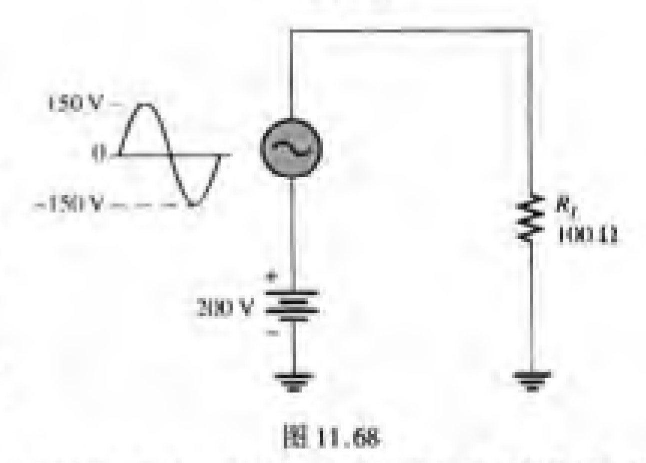


图 11.68

*28. 如图 11.68 所示，一个正弦电压源和一个直流电压源串联在一起，这两个电压进行了有效叠加，试确定负载电阻上的功率损耗。

11.8 节　非正弦波形

29. 根据图 11.69 中的图表，确定 t_r、t_f、t_W 和振幅的近似值。

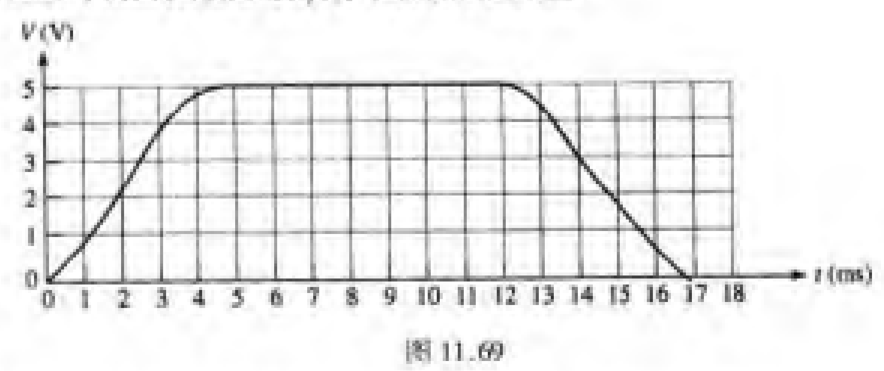


图 11.69

30. 一个脉冲波形的重复频率为 2 kHz，并且脉冲宽度为 1 μs，则占空比为多少？

31. 计算图 11.70 中脉冲波形的平均值。

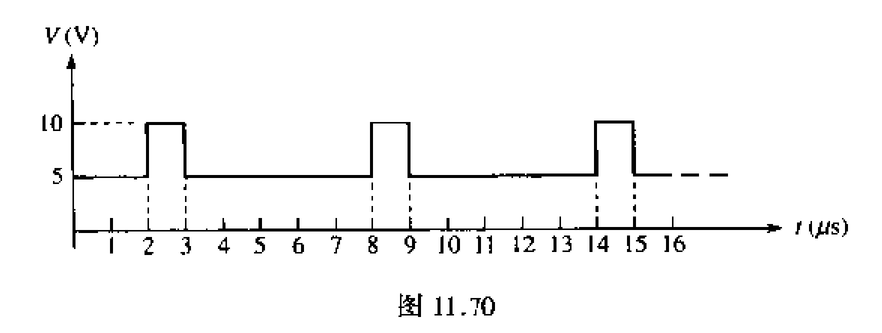
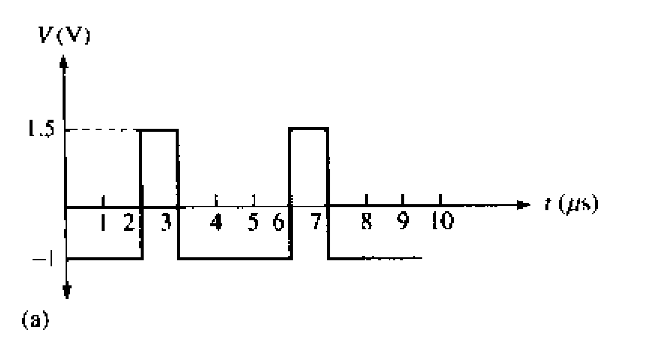


图 11.70

32. 确定图 11.71 中每个波形的占空因数。



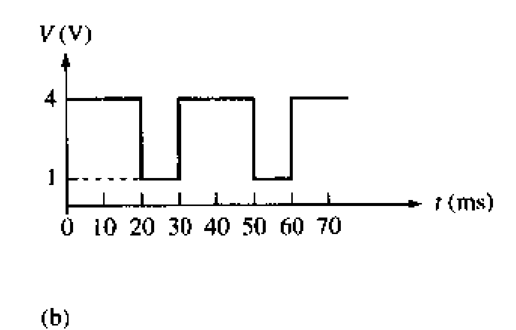
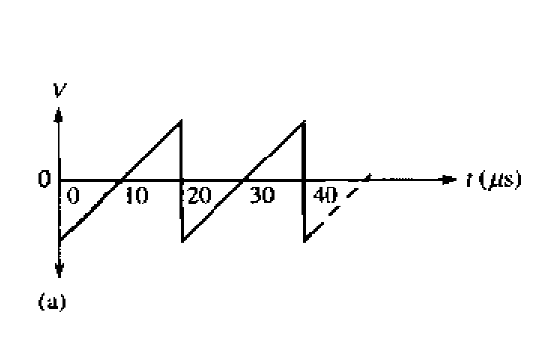


图 11.71

33. 找出图 11.71 中每个脉冲波形的平均值。

34. 图 11.71 中每个波形的重复频率是多少?

35. 图 11.72 中每个锯齿波的频率是多少?



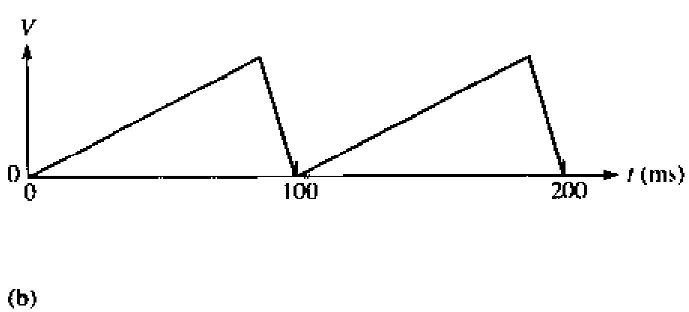


图 11.72

*36. 图 11.73 所示为一个称做阶梯的非正弦波形,试确定其平均值。

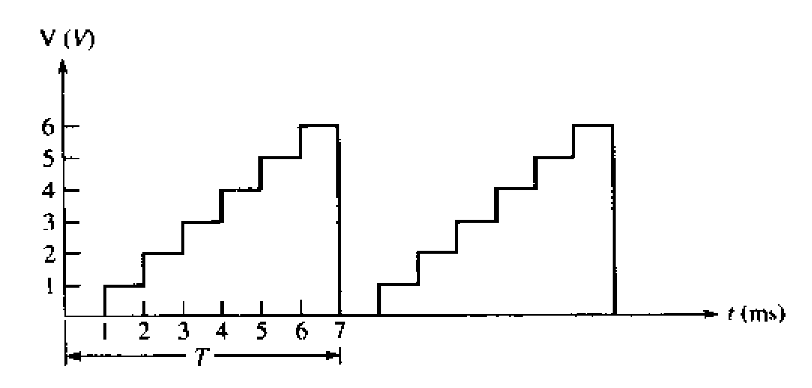


图 11.73

37. 一个方波的周期为 40 μs，试列举出它的前 6 个奇次谐波。

38. 习题 37 中提到的方波的基频是多少？

11.9 节　示波器

39. 确定图 11.74 中示波器屏幕上显示的正弦波的峰值和周期。

40. 确定图 11.75 中示波器屏幕上显示的正弦波的均方根值和频率。

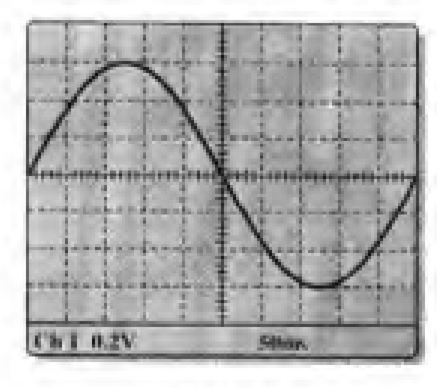


图 11.74

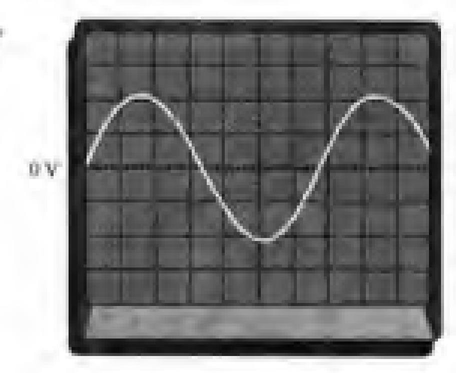





图 11.75

41. 找出图 11.76 中示波器屏幕上显示的脉冲波形的振幅、脉冲宽度和占空因数。

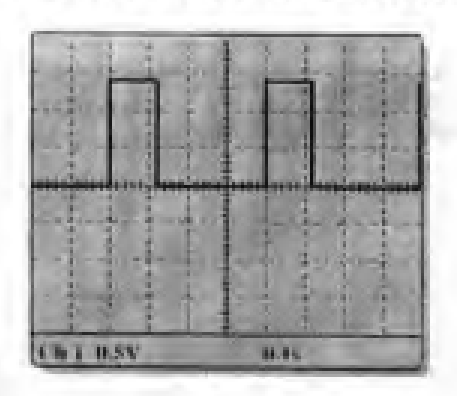


图 11.76

*42. 基于图 11.77 中的仪器和设置，示波器显示的是检查面包板的情况，试确定输入和输出信号的频率和峰值。同时屏幕上显示的波形是 1 通道的，请根据图示的设置画出示波器 2 通道可能显示的波形。

*43. 检查图 11.78 所示面包板和示波器的显示，试确定未知输入信号的峰值和频率。

EWB/Multisim 故障检修

以下习题需要用到本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

44. 打开文件 P11.44，并测量每个电阻两端电压的峰值和均方根值。

45. 打开文件 P11.45，并测量每个电阻两端电压的峰值和均方根值。

46. 打开文件 P11.46，并确定其中是否有错误，如果有，将其指出来。

47. 打开文件 P11.47，并测量电路中每条支路电流的均方根值。

48. 打开文件 P11.48，并确定其中是否有错误，如果有，将其指出来。

49. 打开文件 P11.49，并用示波器测量电阻两端的总电压。

50. 打开文件 P11.50，并用示波器测量电阻两端的总电压。

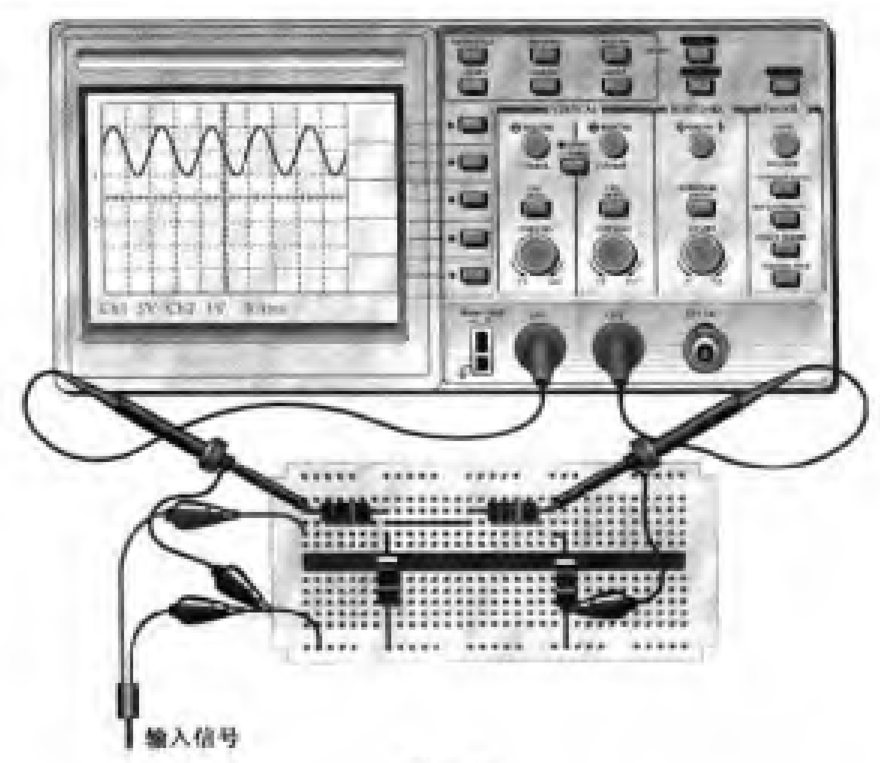


图 11.77

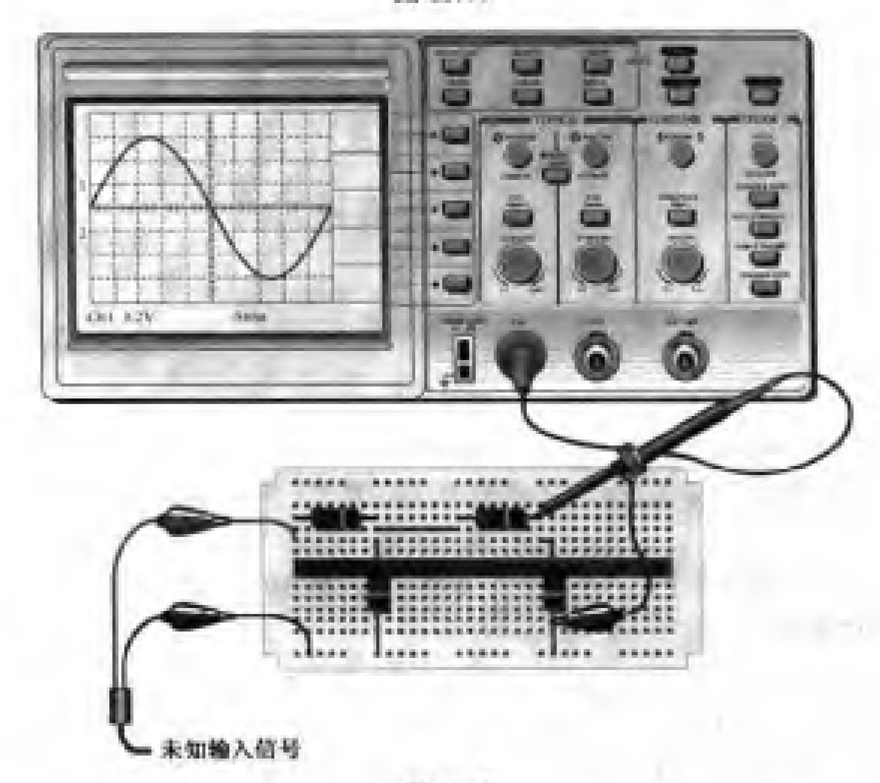


图 11.78

答案

11.1 节 正弦波

1. 正弦波的一个周期是正向过零点位置到正波峰,接着通过反向过零点到达负波峰,最后回到零点位置。
2. 正弦波在过零点位置改变极性。
3. 正弦波在一个周期内有两个最大值点。

4. 周期是从一个过零点位置到下一个对应的过零点位置，或者从一个波峰到下一个对应的波峰。
5. 频率是一秒内完成循环的次数，频率的单位是赫兹。
6. $f = 1/T = 200$ kHz
7. $T = 1/f = 8.33$ ms

11.2 节　正弦电压源

1. 正弦波通过电场和磁场的方法产生。
2. 速度和频率是直接成比例的。
3. 振荡器是产生重复波形的电子电路。

11.3 节　正弦波的电压值和电流值

1. (a) $V_{pp} = 2(1\text{ V}) = 2\text{ V}$　(b) $V_{pp} = 2(1.414)(1.414\text{ V}) = 4\text{ V}$
   (c) $V_{pp} = 2(1.57)(3\text{ V}) = 9.42\text{ V}$
2. (a) $V_{rms} = (0.707)(2.5\text{ V}) = 1.77\text{ V}$　(b) $V_{rms} = (0.5)(0.707)(10\text{ V}) = 3.54\text{ V}$
   (c) $V_{rms} = (0.707)(1.57)(1.5\text{ V}) = 1.66\text{ V}$
3. (a) $V_{avg} = (0.637)(10\text{ V}) = 6.37\text{ V}$　(b) $V_{avg} = (0.637)(1.414)(2.3\text{ V}) = 2.07\text{ V}$
   (c) $V_{avg} = (0.637)(0.5)(60\text{ V}) = 19.1\text{ V}$

11.4 节　正弦波的角度测量

1. (a) 正波峰在 90°位置　(b) 负向过零点在 180°位置
   (c) 负波峰在 270°位置　(d) 周期在 360°位置结束
2. 半周期：180°；π
3. 全周期：360°；2π
4. $90° - 45° = 45°$

11.5 节　正弦波公式

1. $v = (10\text{ V})\sin(120°) = 8.66\text{ V}$
2. $v = (10\text{ V})\sin(45° + 10°) = 8.19\text{ V}$
3. $v = (5\text{ V})\sin(90° - 25°) = 4.53\text{ V}$

11.6 节　交流电路中的欧姆定律和基尔霍夫定律

1. $I_p = V_p/R = (1.57)(12.5\text{ V})/330\ \Omega = 59.5\text{ mA}$
2. $V_{s(rms)} = (0.707)(25.3\text{ V}) = 17.9\text{ V}$

11.7 节　直流电压和交流电压的叠加

1. $+V_{max} = 5\text{ V} + 2.5\text{ V} = 7.5\text{ V}$
2. 是的，它将交变向。
3. $+V_{max} = 5\text{ V} - 2.5\text{ V} = 2.5\text{ V}$

11.8 节　非正弦波形

1. (a)上升时间是指脉冲上升沿上从幅度的 10%到 90%所需要的时间间隔。(b)下降时间是指脉冲下降沿上从幅度的 90%到 10%所需要的时间间隔。(c)脉冲宽度是指从脉冲前沿幅度的 50%到脉冲后沿幅度的 50%所需要的时间间隔。
2. $f = 1/1\text{ ms} = 1\text{ kHz}$
3. d.c. = (1/5)100% = 20%；Ampl. 1.5 V；$V_{avg} = 0.5\text{ V} + 0.2(1.5\text{ V}) = 0.8\text{ V}$
4. $T = 16$ ms
5. $f = 1/T = 1/1\ \mu\text{s} = 1\text{ MHz}$

6. 基频指波形的重复率。
7. 2次谐波:2 kHz
8. $f=1/10\ \mu s=100$ kHz

11.9节 示波器

1. 模拟:信号直接驱动显示。
   数字:信号经过处理转换为数字,接着重建以用来显示。
2. 纵向测量电压,横向测量时间。
3. 示波器可以显示随时间变化的量。
4. 通常,除非试图测量一个非常小的低频信号。

技术实践

1. RF指射频。
2. IF指中频。
3. 载波频率比音频高。
4. 在AM信号中振幅发生变化。

实例相关练习

11.1 2.4 s
11.2 1.5 ms
11.3 20 kHz
11.4 200 Hz
11.5 66.7 kHz
11.6 30 rps
11.7 $V_{pp}=50$ V; $V_{rms}=17.7$ V; $V_{avg}=15.9$ V
11.8 (a) π/12弧度 (b) 360°
11.9 8°
11.10 18.1 V
11.11 $I_{rms}=4.53$ mA; $V_{1(rms)}=4.53$ V; $V_{2(rms)}=2.54$ V
11.12 23.7 V
11.13 图(a)中的波形永远不会出现负值;对于图(b)中的波形,周期的一部分会出现负值。
11.14 5%
11.15 1.2 V
11.16 120 V
11.17 图11.57(a):1.06 V,50 Hz 图11.57(b):88.4 mV,1.67 kHz
图11.57(c):4.81 V,5 kHz 图11.57(d):7.07 V,250 kHz
11.18 15 V,20 ms,50 Hz

自测题

1.(b) 2.(b) 3.(c) 4.(b) 5.(d) 6.(a) 7.(a) 8.(a)
9.(c) 10.(b) 11.(a) 12.(d) 13.(c) 14.(b) 15.(d)

故障检修测验

1.(a) 2.(a) 3.(b) 4.(b) 5.(c) 6.(b)
7.(a) 8.(a) 9.(a) 10.(a) 11.(b) 12.(a)

第 12 章　相量和复数

引言

本章中，将介绍分析交流电路的两个重要工具，即相量和复数。不难看出，相量在表示正弦电压或者正弦电流的幅度和相位方面是多么简便而又形象的方法。在下一章中，将介绍怎样用相量表示交流电路中的其他量。

复数域用来表示相量，并完成对这些量的数学运算。

相量图是一种抽象方法，用来表示既有幅度，又有方向的量。在正弦电压和正弦电流的情况下，大小指正弦波的振幅，方向指正弦波的相位。相量提供了一种用图解法表示正弦波的方法，同时也能表示和其他正弦波的相位关系。复数域提供了一种数学表示相量的方法，同时允许相量之间进行加，减，乘，除。在复数的换算和运算方面都能使用计算器。

本章目标

- 用相量表示正弦波
- 用复数表示相量
- 表示相量的两种复数形式
- 复数的数学计算

主要术语

- 相量
- 角速度
- 复平面
- 实数
- 虚数
- 直角坐标
- 极坐标

技术实践

正如即将介绍的，两个正弦波的相位关系可以用相量以图形的方式表示，同时相位关系也可以在示波器上进行测量。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

12.1　相量介绍

相量提供了一种图形方式，用来表示既有大小又有方向的量(角位置)。相量对于正弦波振幅和相角的表示尤其有用；同时，对后续章节中所要讨论的阻抗电路分析也有很大用途。

学完本节以后，读者应该能够：

- 用相量表示正弦波
- 定义相量
- 画相量图
- 讨论角速度

向量对于我们而言已经很熟悉了:在数学和科学领域,向量是任何既包含大小又包含方向的量。向量的实例有力、速度和加速度。描述向量最简单的方法是将一个量分成振幅和角度。

在电子学中,相量和向量是类似的,但相量通常指的是随时间变化的量,例如正弦波。图 12.1 显示了相量的几个例子。相量的长度(箭头)表示一个量的大小;角度 θ(相对于 0°)表示角位置,如图 12.1(a)中的正角度。图 12.1(b)中的相量是一个特定相量,大小为 2,相角为 45°;图 12.1(c)中的相量大小为 3,相角为 180°;图 12.1(d)中的相量大小为 1,相角为 -45°(或者 +315°)。注意,正角度是从参考位置(0°)逆时针方向(CCW, counterclockwise)测量;负角度是从参考位置顺时针方向(CW, clockwise)测量。

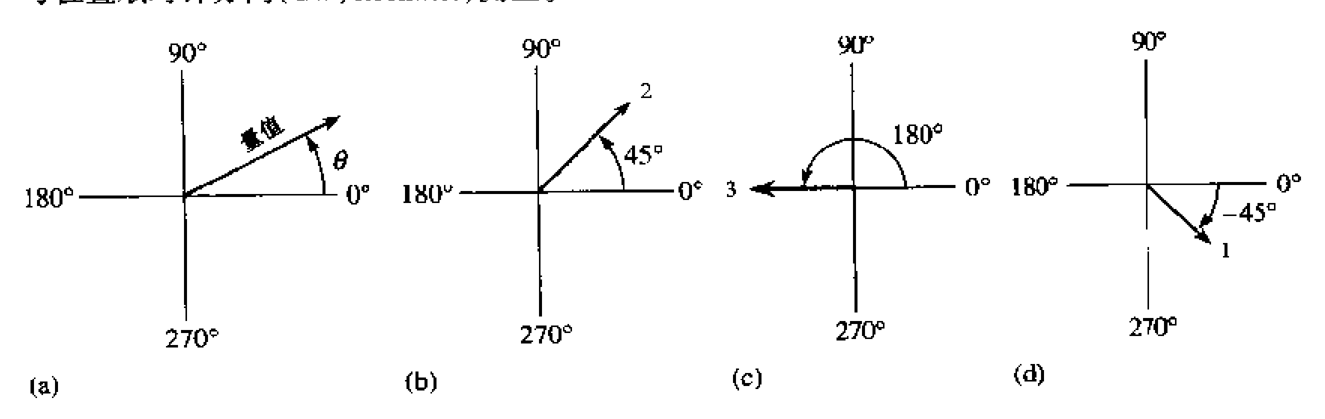


图 12.1 相量的几个例子

12.1.1 正弦波的相量表示

正弦波的一个完整周期可以用相量的 360°旋转来表示。

正弦波在任意一点的瞬时值等于相量的末端到水平轴的垂直距离。

图 12.2 显示了正弦波从 0°到 360°时,相量是如何描绘正弦波的。可以把这个概念和交流发生器中的旋转联系起来。注意,相量的长度等于正弦波的峰值(观察 90°点和 270°点);从 0°点开始测量的相量的角度是正弦波上所对应的角度。

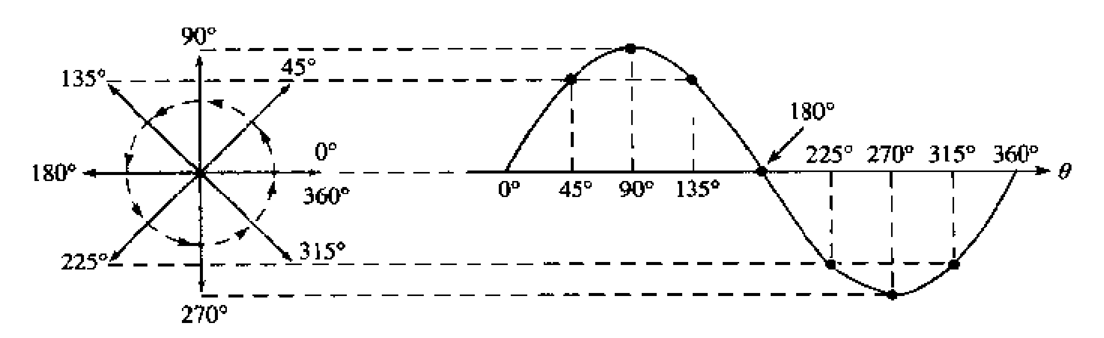


图 12.2 用相量转动表示的正弦波

12.1.2 相量和正弦波公式

观察一下特定角上的相量表示。图 12.3 显示了一个在 45°角位置的电压相量及正弦波上对应的点。正弦波在这点上的瞬时值和相量的位置以及相量的长度有关。正如前面所提到的那样,从相量末端到水平轴的垂直距离表示正弦波在这点上的瞬时值。

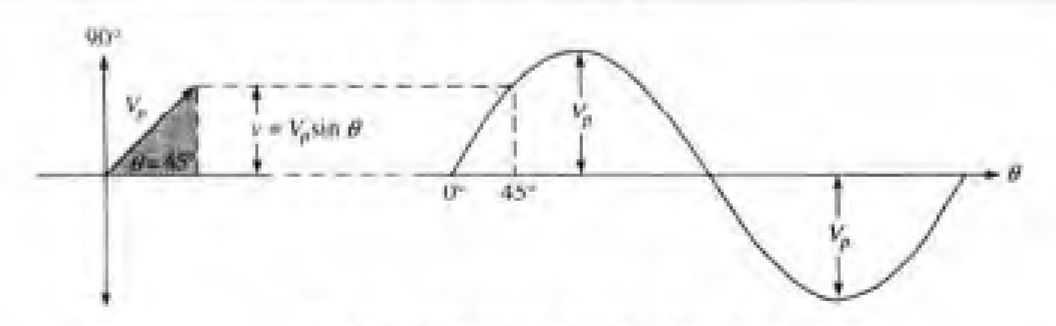


图 12.3　正弦波公式的直角三角推导

注意，从相量的末端画一条垂线到水平轴时，如图 12.3 中的阴影部分所示，就组成了一个直角三角形。相量的长度是三角形的斜边；同时，根据三角学，垂直投影是对边。

直角三角形的对边等于斜边乘以角 θ 的正弦值。

相量的长度是正弦电压的峰值 V_p。因此，直角三角形的对边，也就是瞬时值可以表示为：

$$v = V_p\sin\theta$$

回想起这个公式在第 11 章中是用于计算瞬时正弦电压的。用一个类似的公式应用于正弦电流：

$$i = I_p\sin\theta$$

12.1.3　正相角和负相角

如上所述，相量在任何瞬时位置都能用正相角或者对应的负相角表示。正相角从 0°逆时针方向测量，负相角从 0°顺时针方向测量。如图 12.4(a)所示，对一个给定的正相角 θ，对应的负相角为 $\theta-360°$。图 12.4(b)显示了一个特殊的例子，其中相量的角度为 $+225°$或者 $-135°$。

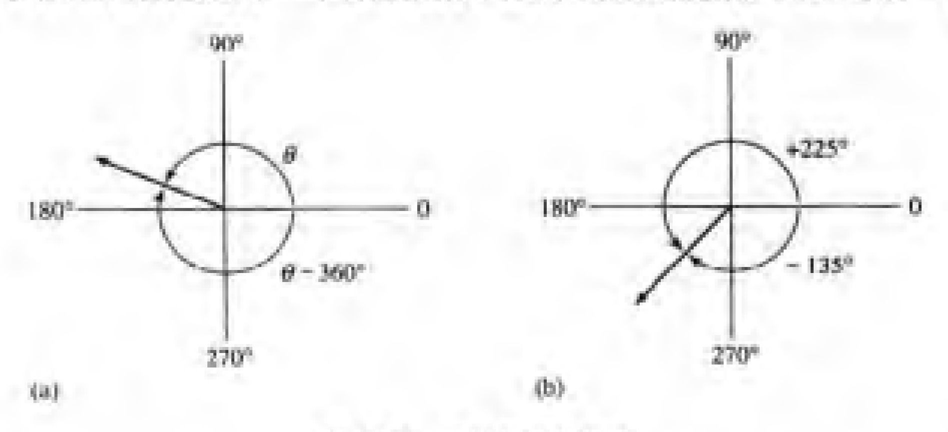


图 12.4　正相角和负相角

例 12.1　对图 12.5 中的每个相量，确定正弦波的瞬时值，同时把每个正相角表示为等价的负相角。每个相量的长度表示正弦波的峰值。

解：(a) $v = (10\text{ V})\sin 0° = (10\text{ V})(0) = \mathbf{0\ V}$

$\theta = \mathbf{0°}$

(b) $v = (10\text{ V})\sin 30° = (10\text{ V})(0.5) = \mathbf{5\ V}$

$\theta = 30° = \theta - 360° = 30° - 360° = \mathbf{-330°}$

(c) $v = (10\text{ V})\sin 90° = (10\text{ V})(1) = \mathbf{10\ V}$

$\theta = 90° = \mathbf{-270°}$

(d) $v = (10\ \text{V})\sin 135° = (10\ \text{V})(0.707) = \mathbf{7.07\ V}$

$\theta = 135° = \mathbf{-225°}$

(e) $v = (10\ \text{V})\sin 270° = (10\ \text{V})(-1) = \mathbf{-10\ V}$

$\theta = 270° = \mathbf{-90°}$

(f) $v = (10\ \text{V})\sin 330° = (10\ \text{V})(-0.5) = \mathbf{-5\ V}$

$\theta = 330° = \mathbf{-30°}$

对应的负相角如图 12.5 所示。

练习:如果相量在 45°位置,长度为 15 V,那么正弦波的瞬时值是多少?

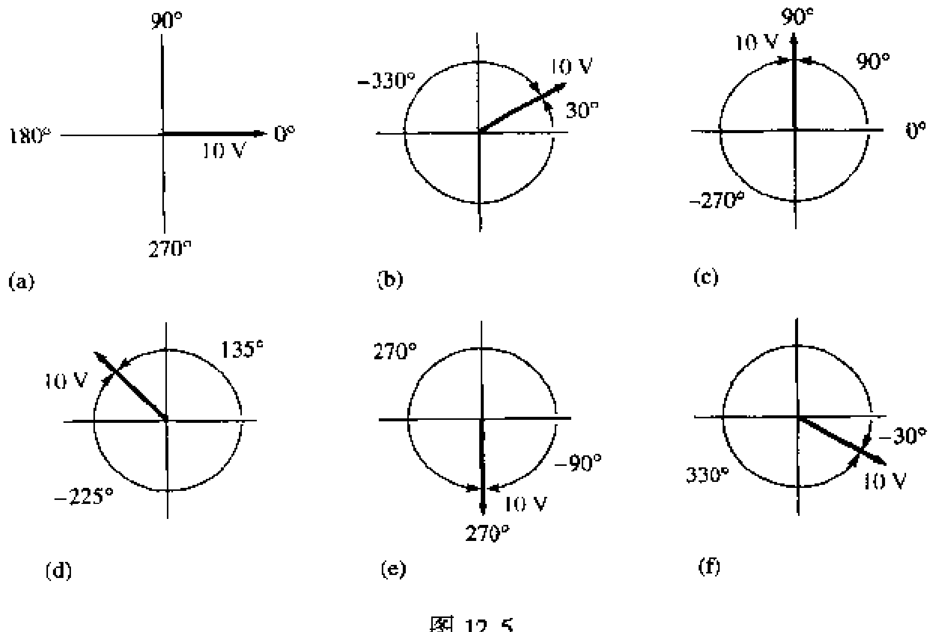


图 12.5

12.1.4 相量图

相量图通常用于显示具有相同频率的两个或者更多正弦波的相对关系。固定位置上的相量通常表示一个完整的正弦波,因为一旦具有相同频率的两个或者更多正弦波之间的相角确立,或者正弦波和参考位置之间的相角确立,相角在整个周期中保持不变。例如,图 12.6(a)中的两个正弦波可以用图 12.6(b)中的相量图表示。如图中所示,正弦波 B 超前正弦波 A 30°;并且,正如相量长度所显示的,正弦波 B 的幅度比正弦波 A 的小。

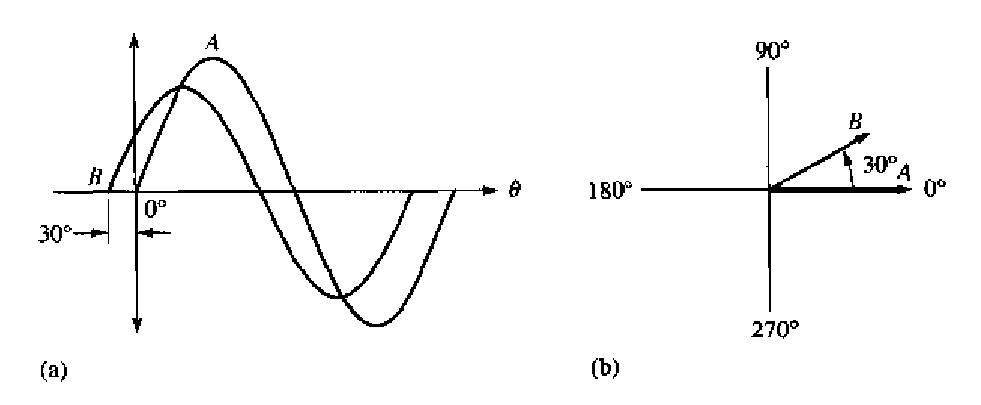


图 12.6 相量图举例

例 12.2　用相量图表示图 12.7 中的正弦波。

解: 相量图表示的正弦波如图 12.8 所示，每个相量的长度表示正弦波的峰值。

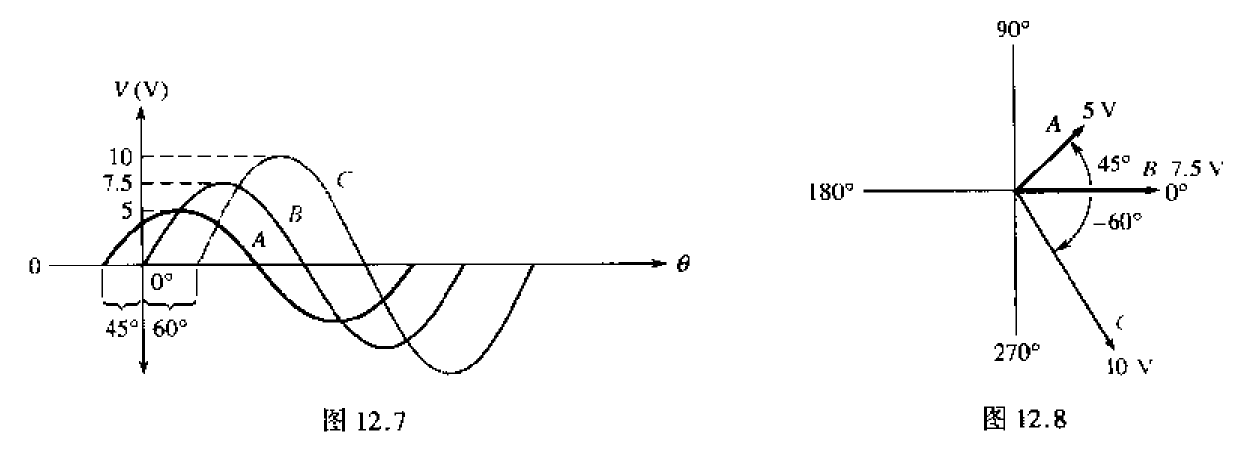


图 12.7　　　　图 12.8

练习: 用相量描述一个正弦波，该正弦波的峰值为 5 V，并且滞后于图 12.7 中的正弦波 C 25°。

12.1.5 相量的角速度

正如所看到的那样，一个相量旋转经过 360°时，就可以描绘出正弦波的一个周期。相量旋转得越快，正弦波也绘制得越快。因此，周期和频率与相量旋转的速度有关。这个旋转速度称为角速度，用 ω（小写的希腊字母）表示。

一个相量旋转经过 360°或者 2π 弧度时，就可以描绘出一个完整的周期。因此，相量经过 2π 弧度所需要的时间就是正弦波的周期。因为相量旋转经过 2π 弧度的时间等于周期 T，因此角速度可以表示为：

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

因为 $f = 1/T$，

$$\omega = 2\pi f \tag{12.1}$$

一个相量以角速度 ω 旋转时，ωt 就是相量所经过任何瞬时 t 的角度。因此，可以用下列关系描述：

$$\theta = \omega t \tag{12.2}$$

用 $2\pi f$ 代替 ω，得到 $\theta = 2\pi ft$。根据角度和时间之间的关系，正弦电压瞬时值的方程 $v = V_p \sin\theta$ 可以写为：

$$v = V_p \sin 2\pi ft \tag{12.3}$$

知道频率和峰值，就可计算正弦波曲线在任意时刻 t 的瞬时值。$2\pi ft$ 的单位是弧度。

例 12.3　$V_p = 10$ V，$f = 50$ kHz 时，离正向过零点 3 μs 的正弦电压值是多少？

解:
$$v = V_p \sin 2\pi ft = (10\text{ V})\sin[2\pi(50\text{ kHz})(3\times10^{-6}\text{s})] = \mathbf{8.09\ V}$$

练习: $V_p = 50$ V，$f = 10$ kHz 时，离正向过零点的正弦电压值是多少？

12.1 节练习

1. 什么是相量？
2. 用于表示频率为 1500 Hz 正弦波的相量的角速度是多少？
3. 某个相量的角速度为 628 rad/s，对应多少 Hz 的频率？
4. 画一个相量图用峰值来表示图 12.9 中的两个正弦波。

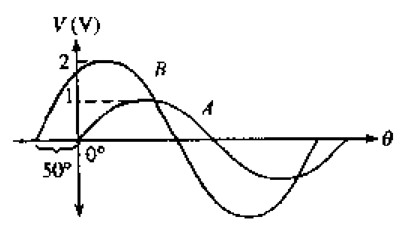


图 12.9

12.2 复数

相量的数学计算可以运用复数,对交流电路的分析是很有用的。运用复数既可以对振幅,也可以对角度的量进行加,减,乘,除。例如对正弦波和以后将要讨论的交流电路量。

学完本节以后,读者应该能够:

- 用复数表示相量
- 描述复平面
- 表示复平面上的点
- 讨论实数和虚数

12.2.1 正数和负数

如图 12.10(a)所示,正数可以用水平轴上零点右侧的点表示,负数可以用水平轴上零点左侧的点表示。同样,如图 12.10(b)所示,正数也可以用垂直轴上零点上侧的点表示,负数也可以用垂直轴上零点下侧的点表示。

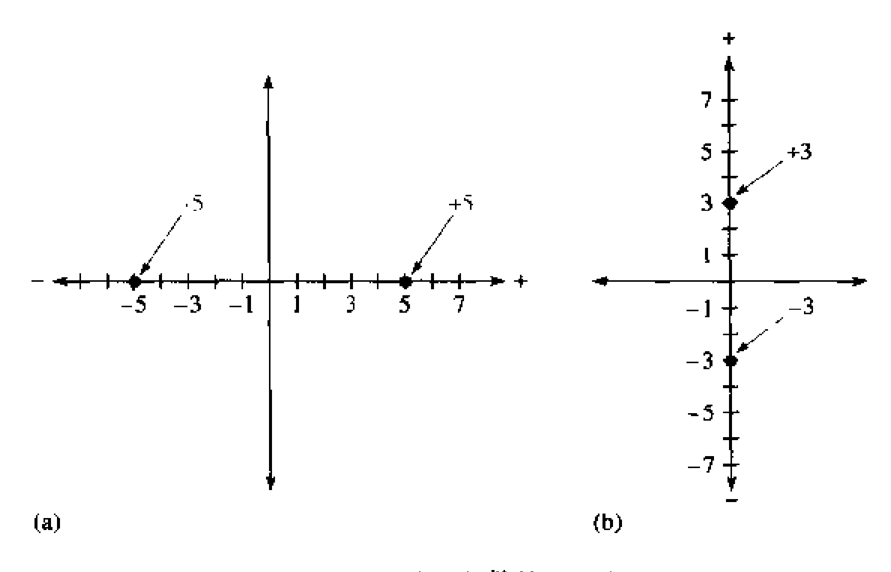


图 12.10　正数和负数的图形表示

12.2.2 复平面

复平面用于区别横轴上的值和纵轴上的值。如图 12.11 所示,在复平面上,横轴称为实轴,纵轴称为虚轴。在电子电路领域中,用前缀 $\pm j$ 指定虚轴上的值,使其和实轴上的值区分开。通常认为这个前缀是 j 运算符,在数学中,通常用 i 代替 j;但在电子电路中,i 会和瞬时电流混淆,所以用 j。

12.2.3 复平面上的角位置

如图 12.12 所示,角位置可以在复平面上表示。正实轴表示零度;逆时针方向继续,$+j$ 轴表示 90°;负实轴表示 180°;$-j$ 轴表示 270°;并且在完成一个完整的 360°旋转后,回到正实轴。注意,复平面分为四个象限。

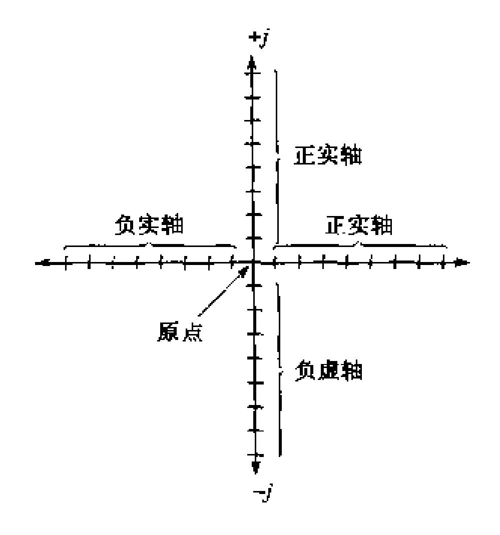



图 12.11　复平面

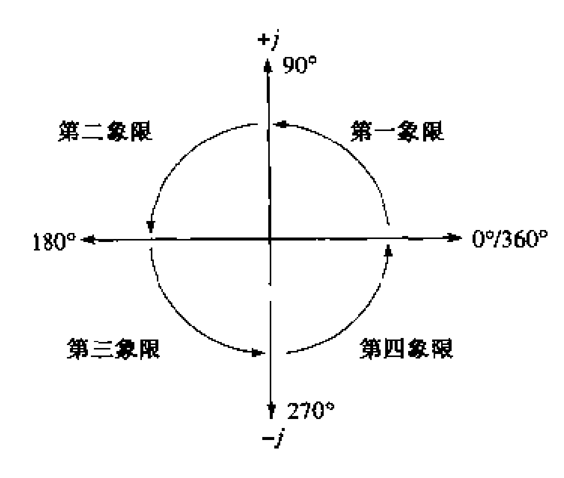


图 12.12　复平面上的角

12.2.4　在复平面上表示一个点

位于复平面上的点可以分类为实数、虚数(± j),或者二者的复合。例如,如图 12.13(a)所示,正实轴上距离原点 4 个单位的点表示正实数 + 4。如图 12.13(b)所示,负实轴上距离原点 2 个单位的点表示负实数 - 2。如图 12.13(c)所示, + j 实轴上距离原点 6 个单位的点表示正虚数 + $j6$。最后,如图 12.13(d)所示, - j 轴上距离原点 5 个单位的点表示负虚数 - $j5$。

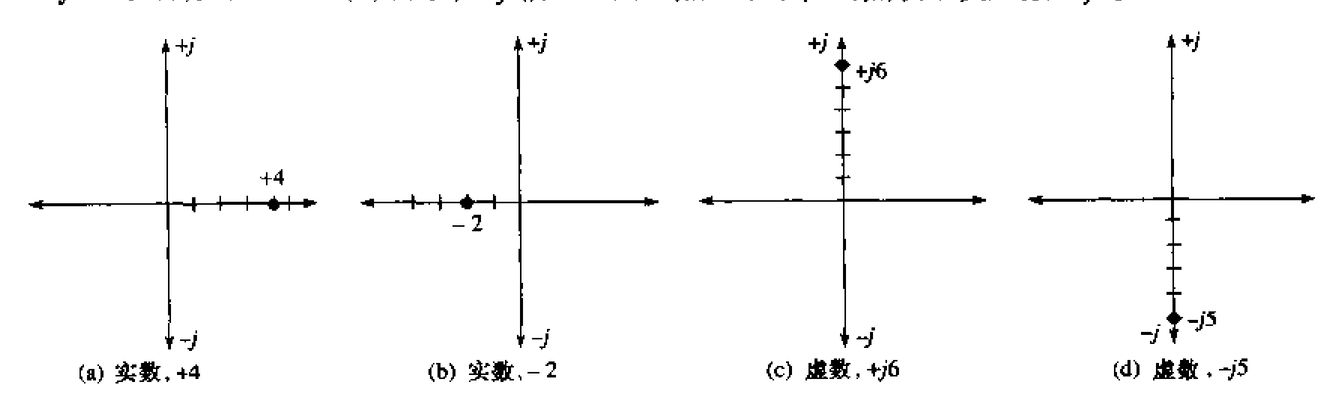


图 12.13　复平面上的实数和虚数(j)

一个点没有位于任一轴上,但在四个象限之一的某一位置上时,就是一个复数,可以用其坐标来定义。例如,图 12.14 中位于第一象限的点的实值为 + 4,虚值为 + $j4$,可以表示为 + 4, + $j4$。位于第二象限的点的坐标为 - 3 和 + $j2$。位于第三象限的点的坐标为 - 3 和 - $j5$。位于第四象限的点的坐标为 + 6 和 - $j4$。

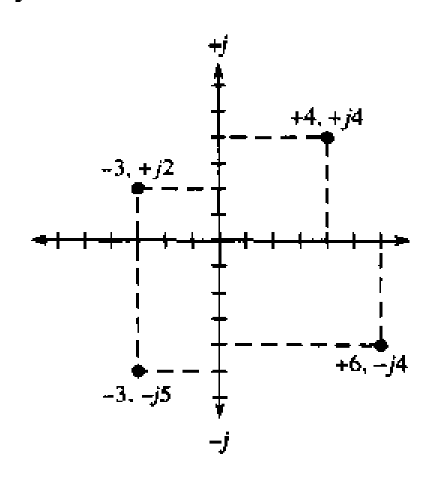


图 12.14　复平面上的坐标点


例 12.4　(a) 在复平面上定位下列点:

7, $j5$; 5, - $j2$; - 3.5, $j1$ 和 - 5.5, - $j6.5$。

(b) 确定图 12.15 中每个点的坐标。

解:(a) 参见图 12.16。

(b) A:**2, $j6$**　　B:**11, $j1$**　　C:**6, - $j2$**　　D:**10, - $j10$**

E:**- 1, - $j9$**　　F:**- 5, - $j5$**　　G:**- 6, $j5$**　　H:**- 2, $j11$**

练习:下列每个点分别位于哪个象限?

(a) $+2.5, +j1$ (b) $7, -j5$ (c) $-10, -j5$ (d) $-11, +j6.8$

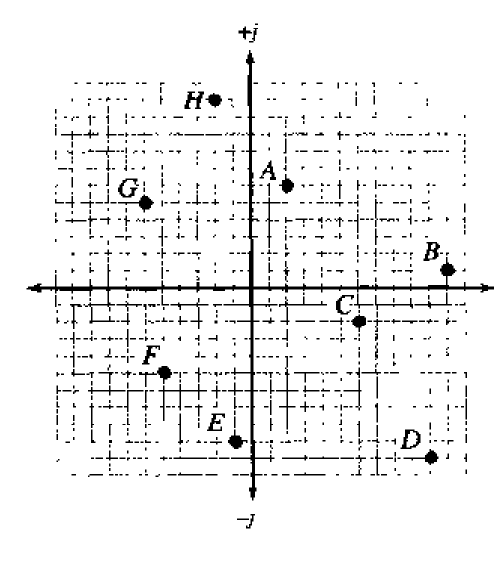


图 12.15

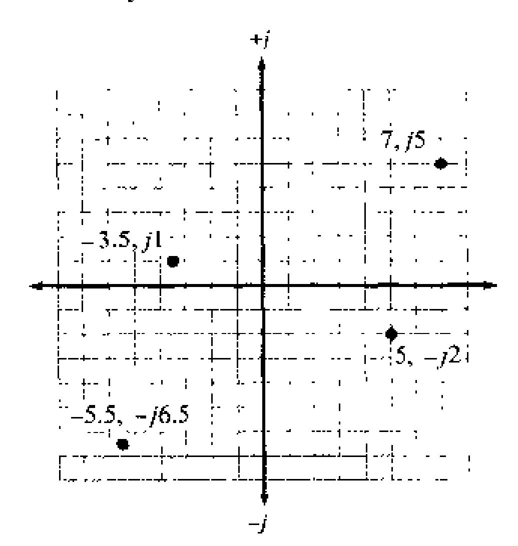


图 12.16

12.2.5 j值

如果用 j 乘以正实值 $+2$,结果是 $+j2$。这项乘法运算有效地把 $+2$ 移动 90°角到 $+j$ 轴上;类似地,$-j$ 乘以 $+2$ 是把 $+2$ 旋转 $-90°$到 $-j$ 轴上。因此,认为 j 是一种旋转运算。

在数学上,j 运算的值为$\sqrt{-1}$。如果 j 乘以 $+j2$,得到:

$$j^2 2 = (\sqrt{-1})(\sqrt{-1})(2) = (-1)(2) = -2$$

这项计算有效地把值移动到了负实轴上。因此,j^2 乘以一个正实数的乘法运算把正实数转变为了负实数,事实上这是在复平面上的 180°旋转。这项运算如图 12.17 所示。

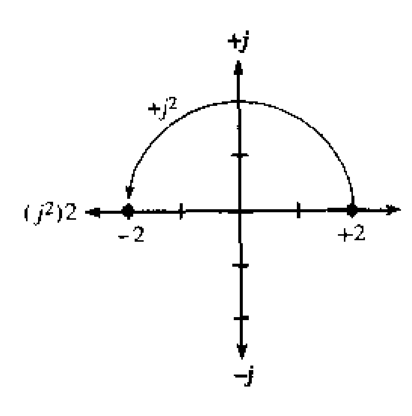


图 12.17 复平面上,在数的定位上j运算符的效应

12.2 节练习

1. 在复平面上定位下列点:

   (a) $+3$ (b) -4 (c) $+j1$

2. 下列数字间的角度有什么不同?

   (a) $+4$ 和 $+j4$ (b) $+j6$ 和 -6 (c) $+j2$ 和 $-j2$

12.3 直角坐标形式和极坐标形式

直角坐标形式和极坐标形式是用复数来表示相量的两种形式。用于电路分析时,每一种形式都有一定的优点,这取决于特定的应用。

学完本节以后,读者应该能够:

- 用两种形式表示相量
- 展示怎样用直角坐标形式表示相量

- 展示怎样用极坐标形式表示相量
- 在直角坐标形式和极坐标形式之间进行转换

如上所述，一个相量既包含大小，又包含角位置或者相位。本书中的斜体字母，例如 V 和 I 只用于表示大小；正的黑体字母，例如 **V** 和 **I** 用于表示完全相量。其他能用相量形式表示的电量将在后面讨论。

12.3.1 直角坐标形式

在直角坐标形式中，用坐标的实值(A)和 j 值(B)的代数和来表示相量，表现为下列一般形式：

$$A + jB$$

复平面上从原点到坐标点所画的"箭头"用于图形表示相量。图 12.18 中的复平面上显示了相量的几个例子：$1 + j2$，$5 - j3$，$-4 + j4$ 和 $-2 - j6$。

不难看出，直角坐标用相量投影到实轴和虚轴上的值来表示相量。

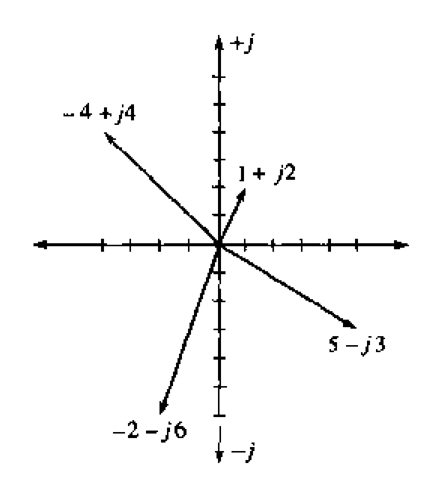


图 12.18 用直角坐标标定相量的几个例子

12.3.2 极坐标形式

相量也可以用极坐标形式表示。极坐标包含相量大小(C)和相对于正实轴的角度位置(θ)，表现为下列一般形式：

$$C\angle \pm \theta$$

示例如 $2\angle 45°$，$5\angle 120°$，$4\angle -110°$ 和 $8\angle -30°$。第一个数字是大小，于角度值前加符号∠。图 12.19 在复平面上显示了这些相量。当然，相量的长度表示量的大小。记住，每一个极坐标形式下的相量在直角坐标形式下也有一个等价的表达式。

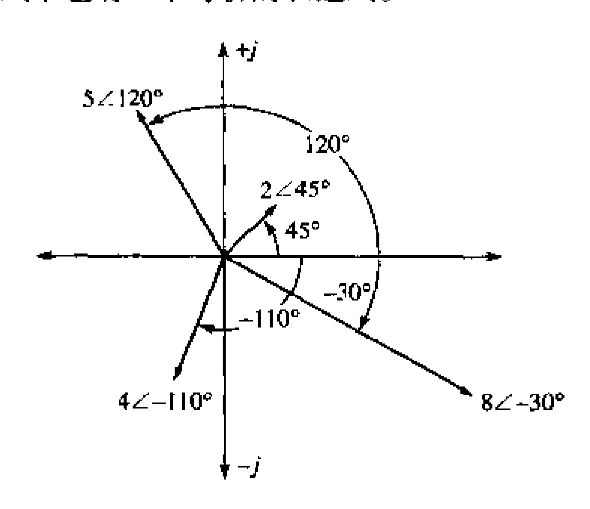


图 12.19 用极坐标标定的相量的几个例子

大部分计算器提供了直角坐标形式和极坐标形式之间的转换功能。首先将介绍基本转换方法，使你对转换的数学步骤有所了解，接着再介绍计算器方法。

12.3.3 从直角坐标形式到极坐标形式的转换

如图 12.20 所示，一个相量可以出现在复平面上四个象限中的任何一个之中。每种情况下的相角 θ 都是相对于正实轴(0°)测得的；同时，ϕ 是第二象限和第三象限中相对于负实轴的角度。

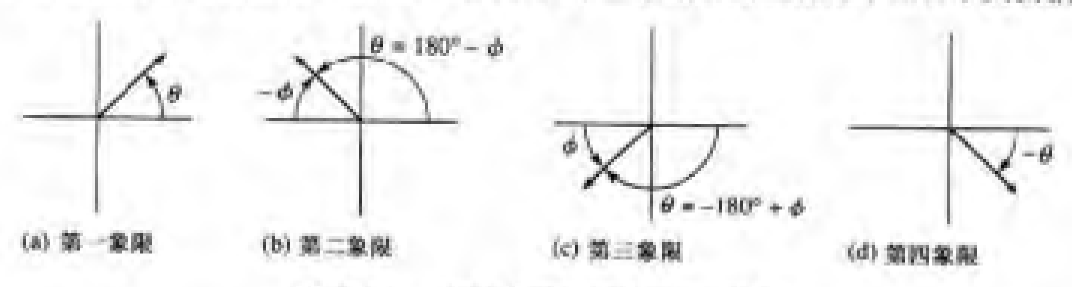


图 12.20　相量在象限中所有可能的位置

直角坐标形式转换为极坐标形式的第一步是确定相量的大小。如图 12.21 所示，可以看到相量对每个象限都组成了一个直角三角形。三角形的水平边是实值 A，垂直边是 j 值 B，斜边是相量的长度 C，用于表示大小。运用毕达哥拉斯(Pythagorean)定理可以表示如下：

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \tag{12.4}$$

接下来，将图 12.21(a)和图 12.21(d)所示的角度 θ 表示为反正切函数：

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\pm B}{A}\right) \tag{12.5}$$

图 12.21(b)和图 12.21(c)所示的角度 θ 为：

$$\theta = \pm 180° \mp \phi$$

上面的公式正如对偶的正负号所描绘的那样，包含了两种情况。

$$\theta = \pm 180° \mp \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) \tag{12.6}$$

在每种情况下，计算时必须用适当的正负号。直角坐标形式转换为极坐标形式的一般方程为：

$$\pm A \pm jB = C\angle \pm \theta \tag{12.7}$$

例 12.5 对转换过程进行了举例说明。

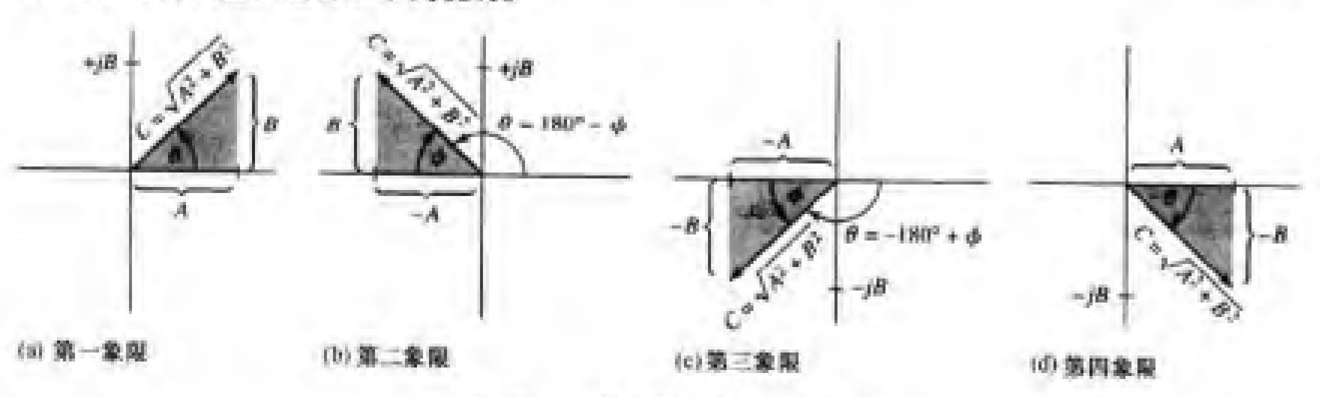


图 12.21　复平面中的直角关系

例 12.5　通过确定大小和角度，把下列复数从直角坐标形式转换为极坐标形式。

(a) $8 + j6$　(b) $10 - j5$　(c) $-12 - j18$　(d) $-7 + j10$

解:(a) 相量 $8+j6$ 的大小为:

$$C=\sqrt{A^2+B^2}=\sqrt{8^2+6^2}=\sqrt{100}=\mathbf{10}$$

由于相量位于第一象限,采用式(12.5),角度为:

$$\theta=\tan^{-1}\left(\frac{\pm B}{A}\right)=\tan^{-1}\left(\frac{6}{8}\right)=\mathbf{36.9^\circ}$$

θ 是相对于正实轴的角度,则该相量完整的极坐标表达式为:

$$\mathbf{C}=10\angle 36.9^\circ$$

正的黑体字母表示相量。

(b) 相量 $10-j5$ 的大小为:

$$C=\sqrt{10^2+(-5)^2}=\sqrt{125}=\mathbf{11.2}$$

由于相量位于第四象限,采用式(12.5),角度为:

$$\theta=\tan^{-1}\left(\frac{-5}{10}\right)=\mathbf{-26.6^\circ}$$

θ 是相对于正实轴的角度,则该相量完整的极坐标表达式为:

$$\mathbf{C}=11.2\angle -26.6^\circ$$

(c) 相量 $-12-j18$ 的大小为:

$$C=\sqrt{(-12)^2+(-18)^2}=\sqrt{468}=\mathbf{21.6}$$

由于相量位于第三象限,采用式(12.6),角度为:

$$\theta=-180^\circ+\tan^{-1}\left(\frac{18}{12}\right)=-180^\circ+56.3^\circ=\mathbf{-123.7^\circ}$$

则该相量完整的极坐标表达式为:

$$\mathbf{C}=21.6\angle -123.7^\circ$$

(d) 相量 $-7+j10$ 的大小为:

$$C=\sqrt{(-7)^2+10^2}=\sqrt{149}=\mathbf{12.2}$$

由于相量位于第二象限,采用式(12.6),角度为:

$$\theta=180^\circ-\tan^{-1}\left(\frac{10}{7}\right)=180^\circ-55^\circ=\mathbf{125^\circ}$$

则该相量完整的极坐标表达式为:

$$\mathbf{C}=12.2\angle 125^\circ$$

练习:把 $18+j23$ 转换为极坐标形式。

12.3.4 从极坐标形式到直角坐标形式的转换

如图 12.22 所示,极坐标形式给出了相量的大小和角度。

为了得到直角坐标形式,必须找到三角形的边 A 和边 B。将其用三角学原理表示如下:

$$A=C\cos\theta \tag{12.8}$$

$$B=C\sin\theta \tag{12.9}$$

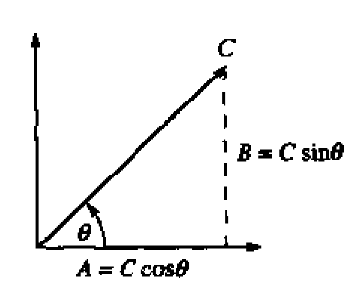


图 12.22　相量的极坐标分量

则极坐标形式到直角坐标形式的转换方程为：

$$C\angle\theta = C\cos\theta + jC\sin\theta = A + jB \tag{12.10}$$

下面的例子证实了这个转换。

例 12.6 将下列极坐标相量转换为直角坐标形式。

(a) $10\angle30°$　(b) $200\angle-45°$　(c) $4\angle135°$

解：(a) 相量 $10\angle30°$ 的实数部分为：

$$A = C\cos\theta = 10\cos30° = 10(0.866) = 8.66$$

相量的 j 部分为：

$$jB = jC\sin\theta = j10\sin30° = j10(0.5) = j5$$

则该相量完整的直角坐标表达式为：

$$A + jB = \mathbf{8.66 + j5}$$

(b) 相量 $200\angle-45°$ 的实数部分为：

$$A = 200\cos(-45°) = 200(0.707) = 141$$

相量的 j 部分为：

$$jB = j200\sin(-45°) = j200(-0.707) = -j141$$

则该相量完整的直角坐标表达式为：

$$A + jB = \mathbf{141 - j141}$$

(c) 相量 $4\angle135°$ 的实数部分为：

$$A = 4\cos135° = 4(-0.707) = -2.83$$

相量的 j 部分为：

$$jB = j4\sin135° = j4(0.707) = j2.83$$

则该相量完整的直角坐标表达式为：

$$A + jB = \mathbf{-2.83 + j2.83}$$

练习：将 $78\angle-26°$ 转换为直角坐标形式。

12.3.5 复数的计算器转换

以下的讨论和例子适用于 TI-86 型计算器，其他计算器上的过程可能有所不同。

复数的输入　所有的复数都必须以括号开始，并以括号结束。对直角坐标形式，分量之间必须用一个逗号分隔开；对极坐标形式，分量之间必须用一个角度符号分隔开，角度符号是个次功能。复数在 TI-86 型计算器上输入如下。直角坐标形式的数用以下这种格式来输入：

(实部，虚部)

极坐标形式的数用以下这种格式来输入：

(大小∠角度)

例 12.7 在计算器上输入下列复数：

(a) $3 + j4$　(b) $10 - j8$　(c) $4\angle30°$　(d) $25\angle-60°$

解：(a) $3 + j4$ 输入为 **(3,4)**。

(b) $10 - j8$ 输入为 **(10, -8)**。

(c) $4\angle30°$ 输入为 **(4∠30)**。

(d) $25\angle-60°$ 输入为 **(25∠-60)**。

练习：在计算器上输入复数：$15 + j18$ 和 $130\angle45°$。

形式转换　为了把复数从一种形式转换为另一种形式，可以在计算器上用 MODE 键先选择状态。为了得到状态屏幕，先按 2nd 键，再按 MODE 键，将出现状态屏幕，如图 12.23 所示。闪亮的（暗色的）项目表明默认的选择。当然，我们只对 Radian（弧度）/Degree（度）和 RectC（复数的直角坐标形式）/PolarC（复数的极坐标形式）感兴趣。Degree 是角度的默认值，PolarC 是复数形式的默认值。为选择未选定的项目，可以用箭头键和 ENTER 键移动闪亮框到所需要的项目上。按 EXIT 键退出状态屏幕。



图 12.23　默认的状态屏幕

当 PolarC 闪亮时，可以用直角坐标形式输入一个数，并将其转换为极坐标形式。要做到这一点，只须输入直角坐标数字，再按 ENTER 键。

（实部，虚部）　ENTER ⟶（大小∠角度）

为了从极坐标形式转换为直角坐标形式，可以用方向箭头键把闪亮框从 Normal 向下移动到 RectC，并按 ENTER 键。退出状态屏幕后，输入极坐标数字，再按 ENTER 键。

（大小∠角度）　ENTER ⟶（实部，虚部）

例 12.8　(a) 将 $10 - j5$ 转换为极坐标形式。(b) 将 $10\angle 30°$ 转换为直角坐标形式。

解：(a) 在状态屏幕上选择 PolarC，退出，输入直角坐标数字，最后按 ENTER 键，结果如图 12.24(a) 所示。为了查看屏幕上没有显示出来的数字，可以按向右的箭头键。

(b) 在状态屏幕上选择 RectC，退出，输入极坐标数字，最后按 ENTER 键，结果如图 12.24(b) 所示。

练习：(a) 将 $8 + j6$ 转换为极坐标形式。(b) 将 $200\angle -45°$ 转换为直角坐标形式。

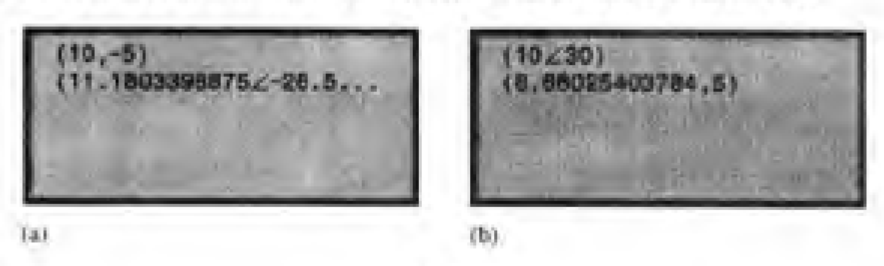
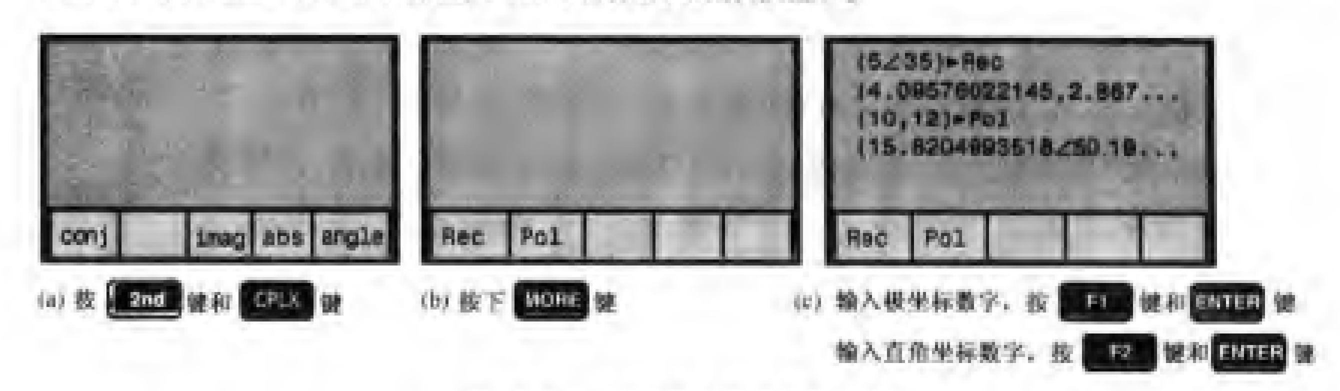


图 12.24

复数（CPLX）模式　极坐标到直角坐标转换和直角坐标到极坐标转换的另外一种方法是 CPLX 模式，这种模式可以按 2nd 键和 CPLX 键选择。在这种模式下，可以看到图 12.25(a) 所示的屏幕显示。按下 MORE 键，可以得到图 12.25(b) 所示的屏幕显示。



(a) 按 2nd 键和 CPLX 键　(b) 按下 MORE 键　(c) 输入极坐标数字，按 F1 键和 ENTER 键
输入直角坐标数字，按 F2 键和 ENTER 键

图 12.25　运用 CPLX 模式进行转换

为把极坐标数字转换为直角坐标形式，首先以适当的格式(大小∠角度)输入数字，接着按F1键，最后按ENTER键。为把直角坐标数字转换为极坐标形式，首先以适当的格式(实部，虚部)输入数字，接着按F2键，最后按ENTER键。图12.25(c)是两个实例数字的结果。

12.3节练习

1. 在直角坐标形式中，对复数的两个分量进行命名。
2. 在极坐标形式中，对复数的两个分量进行命名。
3. 把 $2+j2$ 转换为极坐标形式，并指出这个相量位于哪个象限?
4. 把 $5\angle -45°$ 转换为直角坐标形式，并指出这个相量位于哪个象限?

12.4 复数的数学运算

复数之间是可以进行加、减、乘、除的。

学完本节以后，读者应该能够：

- 对复数进行数学运算
- 掌握复数相加
- 掌握复数相减
- 掌握复数相乘
- 掌握复数相除
- 将复数应用于正弦波

12.4.1 加法

要使复数相加，复数必须是直角坐标形式。规则是：

将每个复数的实部相加，得到的和为实部；将每个复数的虚部相加，得到的和为虚部。

例12.9 将下列两组复数相加：

(a) $8+j5$ 和 $2+j1$　　(b) $20-j10$ 和 $12+j6$

解：(a) $(8+j5)+(2+j1)=(8+2)+j(5+1)=\mathbf{10+j6}$

(b) $(20-j10)+(12+j6)=(20+12)+j(-10+6)=32+j(-4)=\mathbf{32-j4}$

练习：将 $5-j11$ 和 $-6+j3$ 相加。

12.4.2 减法

像加法一样，要使复数相减，复数必须是直角坐标形式。规则是：

将每个复数的实部相减，得到的差为实部；将每个复数的虚部相减，得到的差为虚部。

例12.10 进行以下减法：

(a) $3+j4$ 减去 $1+j2$　　(b) $15+j15$ 减去 $10-j8$

解：(a) $(3+j4)-(1+j2)=(3-1)+j(4-2)=\mathbf{2+j2}$

(b) $(15+j15)-(10-j8)=(15-10)+j[15-(-8)]=\mathbf{5+j23}$

练习：$-10-j9$ 减去 $3.5-j4.5$。

12.4.3 乘法

在直角坐标形式中，两个复数的乘法可以通过各项依次相乘得到：其中一个复数的每一项和另外一个复数的两项相乘，接着再把得到的实部项和 j 部项（回想 $j \times j = -1$）结合起来即可。例如，

$$(5 + j3)(2 - j4) = 10 - j20 + j6 + 12 = 22 - j14$$

两个数字都是极坐标形式时，它们之间的乘法运算更简单。规则是：

大小相乘，角度代数相加。

例 12.11　进行以下乘法：

(a) $10\angle 45°$ 乘以 $5\angle 20°$　　(b) $2\angle 60°$ 乘以 $4\angle -30°$

解：(a) $(10\angle 45°)(5\angle 20°) = (10)(5)\angle(45° + 20°) = \mathbf{50\angle 65°}$

(b) $(2\angle 60°)(4\angle -30°) = (2)(4)\angle[60° + (-30°)] = \mathbf{8\angle 30°}$

练习：$50\angle 10°$ 乘以 $30\angle -60°$。

12.4.4 除法

在直角坐标形式中，两个复数的除法可以通过下列步骤得到：用分母的共轭复数和分子、分母同时相乘，接着结合各项并简化。一个数的共轭复数可以通过改变 j 项的正负号得到。例如，

$$\frac{10 + j5}{2 + j4} = \frac{(10 + j5)(2 - j4)}{(2 + j4)(2 - j4)} = \frac{20 - j30 + 20}{4 + 16} = \frac{40 - j30}{20} = 2 - j1.5$$

像乘法一样，数字都是极坐标形式时，它们之间的除法运算更简单。规则是：

用分子的大小除以分母的大小得到商的大小，接着用分子的角度减去分母的角度得到商的角度。

例 12.12　进行以下除法：

(a) $100\angle 50°$ 除以 $25\angle 20°$　　(b) $15\angle 10°$ 除以 $3\angle -30°$

解：(a) $\dfrac{100\angle 50°}{25\angle 20°} = \left(\dfrac{100}{25}\right)\angle(50° - 20°) = \mathbf{4\angle 30°}$

(b) $\dfrac{15\angle 10°}{3\angle -30°} = \left(\dfrac{15}{3}\right)\angle[10° - (-30°)] = \mathbf{5\angle 40°}$

练习：$24\angle -30°$ 除以 $6\angle 12°$。

12.4.5 复数的正弦波应用

由于正弦波可以用相量来表示，而相量可以用复数项来描述，或者是直角坐标形式，或者是极坐标形式。例如，4 个串联的正弦电压源具有相同的频率，如图 12.26 所示。正弦波如图 12.27(a)所示，相量表示如图 12.27(b)所示。图 12.26 中负载上的总电压可以通过先把每个相量转换为直角形式，再相加来得到。计算如下：

$$\begin{aligned}\mathbf{V}_{tot} &= \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \mathbf{V}_3 + \mathbf{V}_4 \\ &= 10\angle 120^\circ\ \text{V} + 4\angle 30^\circ\ \text{V} + 8\angle -30^\circ\ \text{V} + 6\angle -130^\circ\ \text{V} \\ &= (-5\ \text{V} + j8.66\ \text{V}) + (3.46\ \text{V} + j2\ \text{V}) + (6.93\ \text{V} - j4\ \text{V}) + (-3.86\ \text{V} - j4.60\ \text{V}) \\ &= 1.53\ \text{V} + j2.06\ \text{V} = 2.57\angle 53.4^\circ\ \text{V}\end{aligned}$$

总电压的大小为 2.57 V,角度为 53.4°。

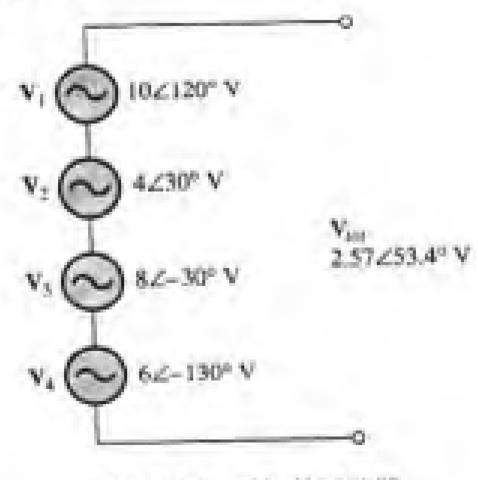


图 12.26 叠加的正弦源

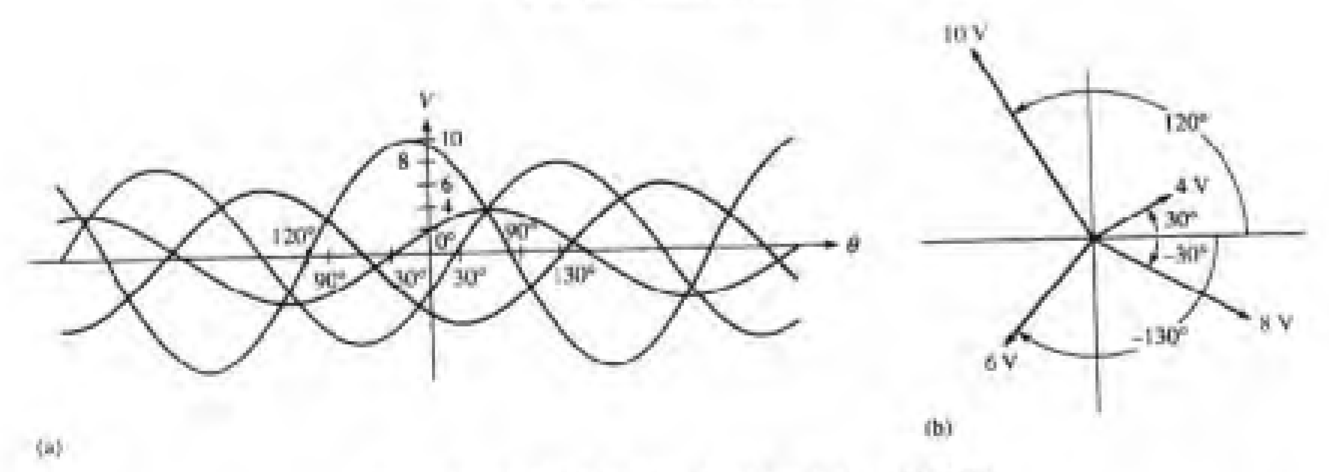


图 12.27 表示图 12.26 中 4 个不同相正弦波的相量图

如上所述,正弦波可以用复数形式表示,并可以运用我们已经讨论过的规则进行加、减、乘、除。同时,正如下面将要介绍的,其他电量,例如容抗、感抗、阻抗和功率都可以用复数形式表示,这样做可以简化许多电路分析问题。

12.4.6 计算器的复数运算

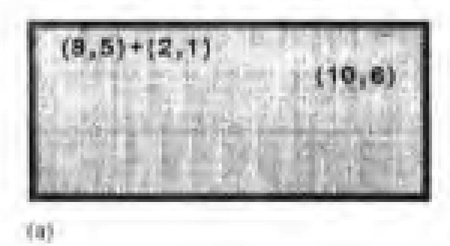
用计算器可以很简单地完成复数的加法、减法、乘法和除法。正如实数运算一样,所有复数运算可以通过简单地输入数字来完成,但数字需要依据算术符号用适当的格式输入。我们用 TI-86 型计算器对这个过程进行举例说明。

加法 为使两个或者更多的复数相加,首先输入带有加号的数字,再按 ENTER 键就可以了。所有要进行加法的数字可以都是直角坐标格式,可以都是极坐标格式,也可以是两种格式的混合。所得结果的形式由状态屏幕上的选项确定。

例 12.13　将下列几组复数相加，并使结果为直角坐标形式。

(a) $8+j5$ 和 $2+j1$　(b) $5\angle 45^\circ$ 和 $10\angle 30^\circ$　(c) $12\angle 20^\circ$ 和 $8+j6$

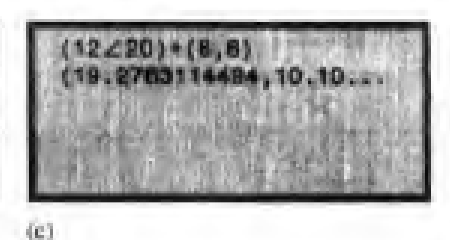
解：对所有这些加法运算，为使和为直角坐标形式，需要在状态屏幕上选择 RectC；接着退出状态屏幕。在输入数字并按 ENTER 键后，计算器屏幕显示应该如图 12.28 所示。



(a)



(b)



(c)

图 12.28

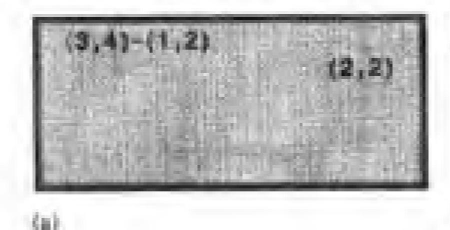
练习：将 $100+j50$、$75-j15$ 和 $35+j65$ 相加，得到的和为极坐标形式。

减法　为使复数之间相减，首先输入带有减号的数字，再按 ENTER 键就可以了。如下面的例子所示。

例 12.14　将下列几组复数相减，并使结果为直角坐标形式。

(a) $3+j4$ 减去 $1+j2$　(b) $12\angle 10^\circ$ 减去 $8\angle 35^\circ$　(c) $100+j50$ 减去 $22\angle 60^\circ$

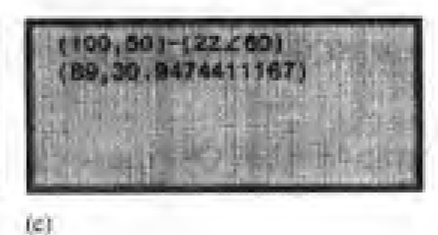
解：对所有这些减法运算，为使差为直角坐标形式，需要在状态屏幕上选择 RectC；接着退出状态屏幕。在输入数字并按 ENTER 键后，计算器屏幕显示应该如图 12.29 所示。



(a)



(b)



(c)

图 12.29

练习：$25-j30$ 减去 $10+j50$，得到的差为极坐标形式。

乘法　为使复数之间相乘，首先输入带有乘号的数字，再按 ENTER 键就可以了。如下面的例子所示。

例 12.15　将下列几组复数相乘，并使结果为极坐标形式。

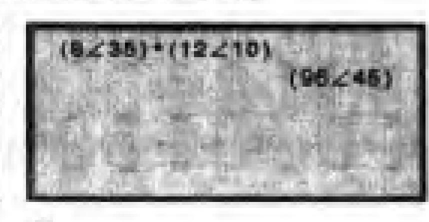
(a) $1+j2$ 和 $3+j4$　(b) $8\angle 35^\circ$ 和 $12\angle 10^\circ$　(c) $22\angle 60^\circ$ 和 $100+j50$

解：对所有这些乘法运算，为使积为极坐标形式，需要在状态屏幕上选择 PolarC；接着退出状态屏幕。在输入数字并按 ENTER 键后，计算器屏幕显示应该如图 12.30 所示。

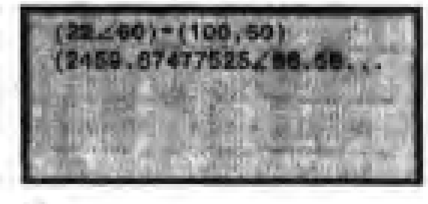
练习：$10+j50$ 和 $25-j30$，得到的积为直角坐标形式。



(a)



(b)



(c)

图 12.30

除法　为使复数之间相除，首先输入带有除号的数字，再按ENTER键就可以了。如下面的例子所示。

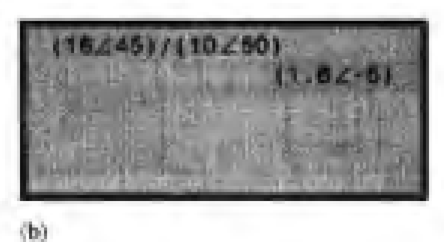
例 12.16　将下列几组复数相除，并使结果为极坐标形式。

(a) $5+j2$ 除以 $4+j4$　　(b) $16\angle 45°$ 除以 $10\angle 50°$　　(c) $25\angle 50°$ 除以 $85+j55$

解：对所有这些除法运算，为使商为极坐标形式，需要在状态屏幕上选择 PolarC；接着退出状态屏幕。在输入数字并按ENTER键后，计算器屏幕显示应该如图 12.31 所示。



(a)



(b)



(c)

图 12.31

练习：$15+j20$ 除以 $15+j10$，得到的商为直角坐标形式。

12.4 节练习

1. 将 $1+j2$ 和 $3-j1$ 相加，并用计算器验证结果。
2. $15+j25$ 减去 $12+j18$，并用计算器验证结果。
3. 将 $8\angle 45°$ 和 $2\angle 65°$ 相乘，并用计算器验证结果。
4. $30\angle 75°$ 除以 $6\angle 60°$，并用计算器验证结果。

技术实践

相量和复数都是数学概念，用于交流电路分析。虽然这部分技术实践中不直接对相量或者复数进行处理，但所测的角度关系是用相量表示的。

一种测量具有相同频率的两个正弦波之间相角的方法是：首先调整示波器屏幕上其中一个波形的振幅，使两个波形的振幅相等；接着测量波形上对应点之间的时间(Δt)，并测出周期。最后通过 $\Delta t/T=\theta/360°$ 的关系计算角度 θ，而 $\theta=(\Delta t/T)360°$。在大部分数字示波器上，光标可以用来确定 Δt 和 T。

另外一种测量具有相同频率的两个正弦波之间相角的方法是：使用模拟示波器，并把水平轴转换为角刻度。接着切断 Sec/Div 控制旋钮的校准位置功能，再调整 Sec/Div 控制旋钮，直到屏幕上恰好显示半个周期的正弦波，如图 12.32(a)所示(通常，数字示波器的时基不能进行再次校准)。如图所示，由于半个周期包含 180°，则在水平方向上，10 个大格中的每一个表示 18°，而每一个小格表示 3.6°。虽然波形散开时找到准确的正波峰很困难，但四分之一周期也可以用于测量。

用其中一个正弦波建立相位刻度以后，必须把示波器两个通道的轨迹线相互叠加起来，并沿水平轴对齐，防止波形之间产生任何纵向偏差。这一步可以通过把通道 1 探头接地(0 V)，或者切换通道输入耦合开关到地线(GND)位置后，校准纵向位置使地线位于屏幕中心线上，如图 12.32(b)所示。对通道 2 轨迹线重复以上步骤。

下一步，把两个探头连接在信号上，这样每个信号都交流耦合(通道输入开关设置为 AC)进入了示波器。示波器应该在参考通道上进行触发——不要用复合触发或者纵向模式触发。应该把振幅设置为近似相等的高度，这可以通过切断 Volts/Div 控制旋钮的校准位置功能，再调整每个波形来实现，结果如图 12.33 所示。这样，就可以从图中的零相交位置非常简单地测出两个波形之间的相角。在这个例子中，角度为 36°。

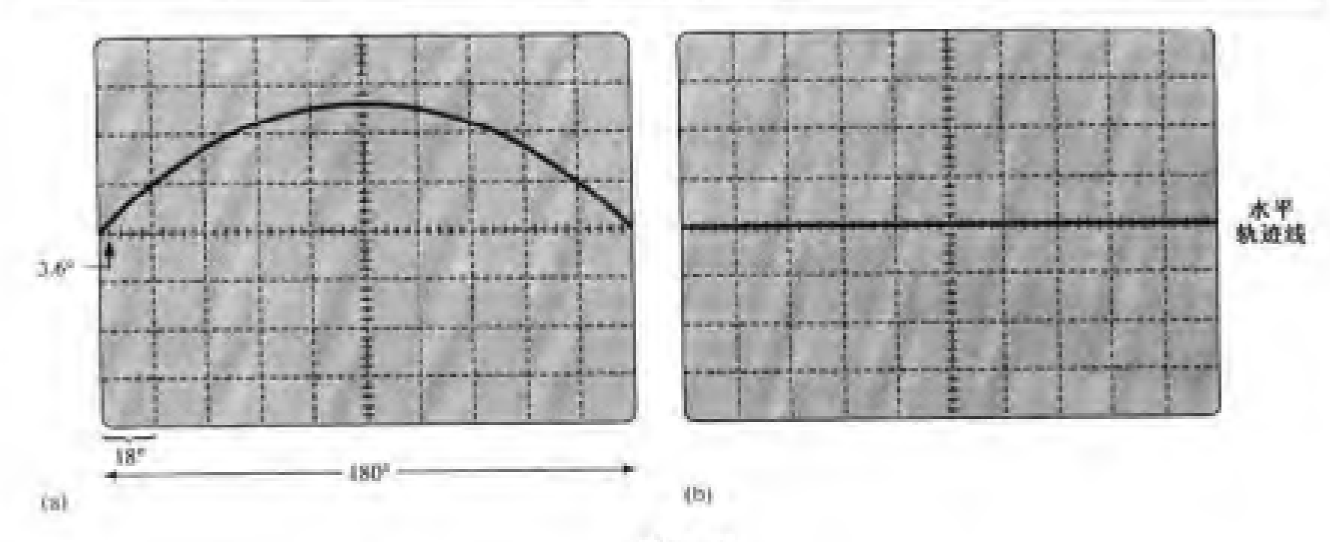


图 12.32

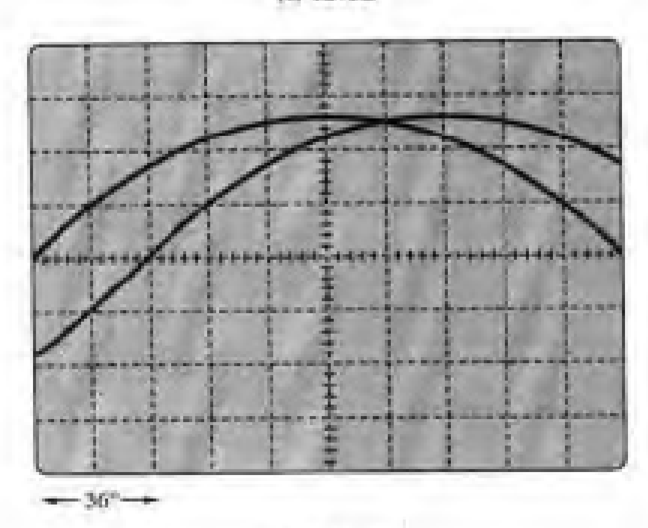


图 12.33

相角的测量

■ 确定图 12.34 中每个示波器显示的相角，图 12.34(c)中显示了四分之一个周期。

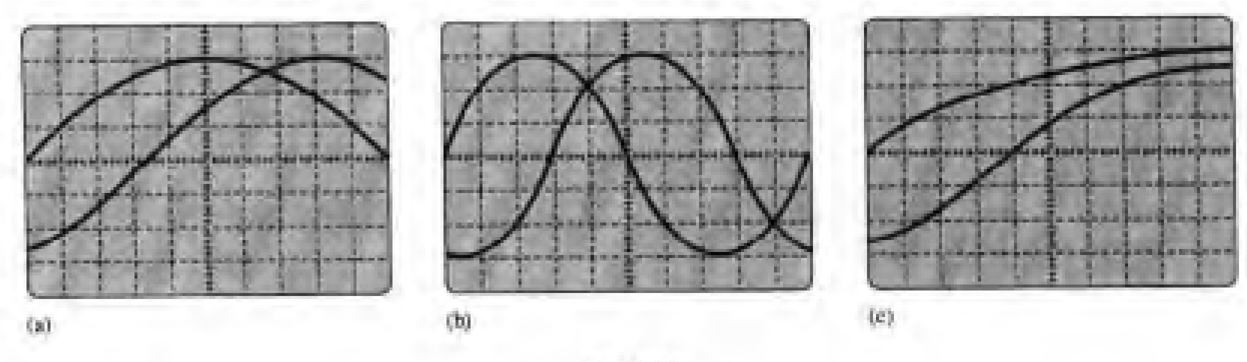


图 12.34

技术实践的练习

1. 在示波器上测量两个波形之间的相角时，Sec/Div 旋钮设置为临界吗？
2. 测量相角时，怎样防止出现波形的纵向偏移？
3. 对相移的测量应该选择哪种触发方式？

小结

- 相量的角度位置表示正弦波相对于参考位置的角度,并且相量的长度表示振幅。
- 复数用于表示相量。
- 复数可以进行加、减、乘、除。
- 复数的直角坐标形式包含实部和虚部,具体形式为:$A + jB$。
- 复数的极坐标形式包含大小和角度,具体形式为:$C\angle \pm \theta$。

主要术语

角速度:同相量表示的正弦波的频率有关的相量旋转速度。

复平面:可以表示既包含大小,又包含方向的量,并由四个象限组成的区域。

虚数:存在于复平面垂直轴上的数。

相量:正弦波的一种表示方法,由大小(振幅)和方向(相角)组成。

极坐标形式:由大小和角度组成的一种复数形式。

实数:存在于复平面水平轴上的数。

直角坐标形式:由实部和虚部组成的一种复数形式。

公式

12.1 $\omega = 2\pi f$

12.2 $\theta = \omega t$

12.3 $v = V_p \sin 2\pi f t$

12.4 $C = \sqrt{A^2 + B^2}$

12.5 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\pm B}{A}\right)$

12.6 $\theta = \pm 180° \mp \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$

12.7 $\pm A \pm jB = C\angle \pm \theta$

12.8 $A = C\cos\theta$

12.9 $B = C\sin\theta$

12.10 $C\angle\theta = C\cos\theta + jC\sin\theta = A + jB$

自测题

1. 相量用于表示____:
   (a) 量的大小 (b) 量的大小和方向 (c) 相角 (d) 量的长度
2. 20°的正角等于____的负角:
   (a) −160° (b) −340° (c) −70° (d) −20°
3. 在复平面上,数 $3 + j4$ 位于____:
   (a) 第一象限 (b) 第二象限 (c) 第三象限 (d) 第四象限
4. 在复平面上,数 $12 - j6$ 位于____:
   (a) 第一象限 (b) 第二象限 (c) 第三象限 (d) 第四象限
5. 复数 $5 + j5$ 等于____:
   (a) $5\angle 45°$ (b) $25\angle 0°$ (c) $7.07\angle 45°$ (d) $7.07\angle 135°$

6. 复数 35∠60°等于____:

(a) $35+j35$ (b) $35+j60$ (c) $17.5+j30.3$ (d) $30.3+j17.5$

7. $(4+j7)+(-2+j9)$等于____:

(a) $2+j16$ (b) $11+j11$ (c) $-2+j16$ (d) $2-j2$

8. $(16-j8)-(12+j5)$等于____:

(a) $28-j13$ (b) $4-j13$ (c) $4-j3$ (d) $-4+j13$

9. $(5\angle 45°)(2\angle 20°)$等于____:

(a) $7\angle 65°$ (b) $10\angle 25°$ (c) $10\angle 65°$ (d) $7\angle 25°$

10. $(50\angle 10°)(25\angle 30°)$等于____:

(a) $25\angle 40°$ (b) $2\angle 40°$ (c) $25\angle -20°$ (d) $2\angle -20°$

习题(标有 * 的习题难度较大.奇数习题的答案在本书的末尾)

12.1 节 相量介绍

1. 相对于 0°参考位置画一幅相量图,用于表示图 12.35 中的正弦波。
2. 画出图 12.36 中相量图所表示的正弦波,相量的长度表示峰值。

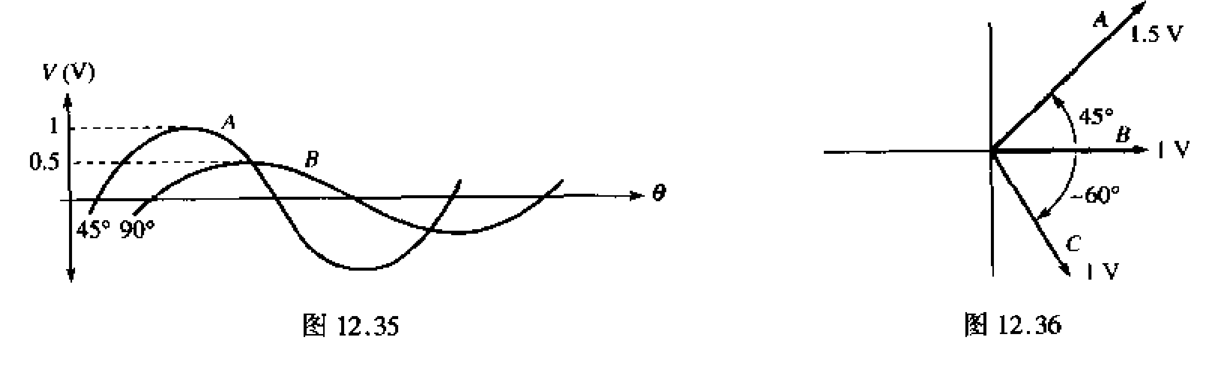


图 12.35 图 12.36

3. 确定下列每个角速度所对应的频率:

(a) 60 rad/s (b) 360 rad/s (c) 2 rad/s (d) 1256 rad/s

4. 从正向零相交位置开始测量,并假定频率为 5 kHz,确定图 12.35 中正弦波 A 在下列每个时刻的值。

(a) 30 μs (b) 75 μs (c) 125 μs

*5. 图 12.35 中,正弦波 A 经过原点到达 0.8 V 要多少微秒?假设频率是 5 kHz。

12.2 节 复数

6. 在复平面上标出下列数字:

(a) $+6$ (b) -2 (c) $+j3$ (d) $-j8$

7. 在复平面上标出下列坐标所描述的点:

(a) $3, j5$ (b) $-7, j1$ (c) $-10, -j10$

*8. 确定习题 7 中和其他各点模相等但复角相差 180°的各点坐标。

*9. 确定习题 7 中和其他各点模相等但复角相差 90°的各点坐标。

12.3 节 直角坐标形式和极坐标形式

10. 复平面内的点描述如下:在直角坐标系内将每一个点用一个复数来表示:

(a) 在实轴上原点右侧 3 个单位,j 轴上方 5 个单位。

(b) 在实轴上原点左侧 2 个单位,j 轴上方 1.5 个单位。

(c) 在实轴上原点左侧 10 个单位,$-j$ 轴下方 14 个单位。

11. 直角边是 10 和 15 的直角三角形斜边的值是多少?

12. 将下列直角坐标系的数值转换成极坐标形式：

(a) $40-j40$ (b) $50-j200$ (c) $35-j20$ (d) $98+j45$

13. 将下列极坐标系数值转换成直角坐标形式：

(a) $1000\angle-50°$ (b) $15\angle160°$ (c) $25\angle-135°$ (d) $3\angle180°$

14. 将下列用正角表示的复数用负角表示：

(a) $10\angle120°$ (b) $32\angle85°$ (c) $5\angle310°$

15. 确定习题 12 中各点所在的象限。

16. 确定习题 14 中各点所在的象限。

17. 写出图 12.37 中各向量用正角表示的极坐标形式。

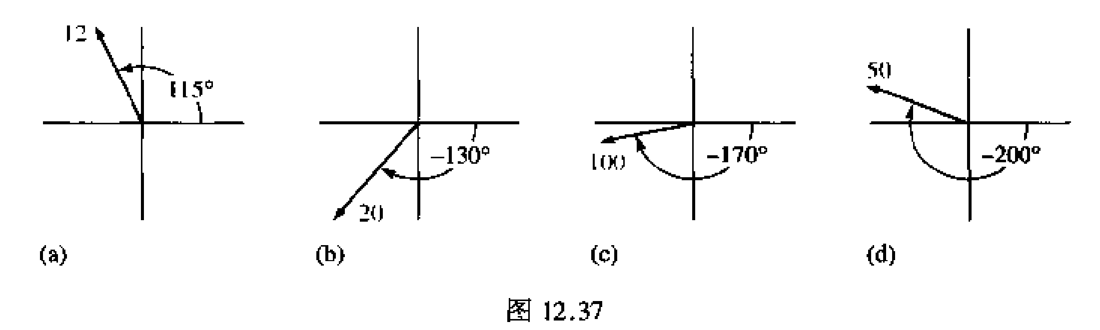


图 12.37

12.4节 复数的数学运算

18. 计算下列复数的和：

(a) $9+j3$ 和 $5+j8$ (b) $3.5-j4$ 和 $2.2+j6$

(c) $-18+j23$ 和 $30-j15$ (d) $12\angle45°$和 $20\angle32°$

(e) $3.8\angle75°$和 $1+j1.8$ (f) $50-j39$ 和 $60\angle-30°$

19. 完成下列减法：

(a) $(2.5+j1.2)-(1.4+j0.5)$ (b) $(-45-j23)-(36+j12)$

(c) $(8-j4)-3\angle25°$ (d) $48\angle135°-33\angle-60°$

20. 计算下列各数的乘积：

(a) $4.5\angle48°$与 $3.2\angle90°$ (b) $120\angle-220°$与 $95\angle200°$

(c) $-31\angle150°$与 $4-j3$ (d) $67+j84$ 与 $102\angle40°$

(e) $15-j10$ 与 $-25-j30$ (f) $0.8+j0.5$ 与 $1.2-j1.5$

21. 计算下列除法：

(a) $\dfrac{8\angle50°}{2.5\angle39°}$ (b) $\dfrac{63\angle-91°}{9\angle10°}$ (c) $\dfrac{28\angle30°}{14-j12}$ (d) $\dfrac{40-j30}{16+j8}$

22. 计算下列表达式：

(a) $\dfrac{2.5\angle65°-1.8\angle-23°}{1.2\angle37°}$ (b) $\dfrac{(100\angle15°)(85-j150)}{25+j45}$

(c) $\dfrac{(250\angle90°+175\angle75°)(50-j100)}{(125+j90)(35\angle50°)}$ (d) $\dfrac{(1.5)^2(3.8)}{1.1}+j\left(\dfrac{8}{4}-j\dfrac{4}{2}\right)$

*23 如图 12.38 所示，三个正弦电压源串联，确定用极坐标表示的总电压和总电流。以后会学到电阻通常有一个 0 相位，所以 $R_2=2.2\angle0°\ \text{k}\Omega$

*24 在图 12.38 中，每个电阻两端的电压大小和相位是多少？

答案

12.1 节　相量介绍

1. 用图形表示时间变化量的模和角度位置
2. 9425 rad/s
3. 100 Hz
4. 参见图 12.39

12.2 节　复数

1. (a) 实轴上原点右侧 3 个单位;(b) 实轴上原点左侧 4 个单位;(c) 虚轴上原点上方 1 个单位
2. (a) 90°　(b) 90°　(c) 180°

R_1 1.0 kΩ
2.5∠0° V
4.2∠30° V
5.1∠−45° V
R_2 2.2 kΩ
R_3 1.8 kΩ

图 12.38

2 V
50°
0°
1 V

图 12.39

12.3 节　直角坐标形式和极坐标形式

1. 实部和虚部　　2. 模和复角
3. 2.828∠45°;第 1　　4. $3.54 - j3.54$,第 4

12.4 节　复数的数学运算

1. $4 + j1$　　2. $3 + j7$
3. 16∠110°　　4. 5∠15°

技术实践

1. 否,Sec/Div 旋钮不设置为临界。
2. 通过叠加轨迹线来防止波形的纵向偏移。
3. 选择参考通道的触发方式。

实例相关练习

12.1 10.6 V
12.2 在 −85°时为 5 V
12.3 34.2 V
12.4 (a) 第 1　(b) 第 4　(c) 第 3　(d) 第 2
12.5 29.2∠52°
12.6 $70.1 - j34.2$
12.7 (15,18);(130∠45)
12.8 (a) (10∠36.8698976458)　(b) (141.421356237, −141.421356237)
12.9 $-1 - j8$
12.10 $-13.5 - j4.5$
12.11 1500∠−50°
12.12 4∠−42°
12.13 (221.359436212∠18.4349488229)
12.14 (52.2015325446∠73.300755766)
12.15 (1750,950)
12.16 (1.30769230769, .461538461538)

自测题

1.(b)　2.(b)　3.(a)　4.(d)　5.(c)　6.(c)　7.(a)　8.(b)　9.(c)　10.(d)

第13章 电　　容

引言

电阻是目前介绍过的惟一无源电子器件。电容和电感是另一种类型的动态电子器件，在第14章我们将学习电感。

本章将介绍电容以及电容特性，讨论其物理组成和电路特性，以及串联并联分析。电容在直流电路和交流电路中如何工作是本章的重点，也是学习电抗电路中的频率响应和时间响应的基础。最后将介绍如何检测不合格的电容。

电容是可以存储电荷的电子元件，能够存储电场能量。电容容量用来衡量电容存储能量的能力。如果在电容上加一正弦信号，电容会以一定的形式产生反应，并产生对电流的阻力，阻力大小取决于所加信号的频率。对电流的这种阻力就是容抗。

本章目标

- 描述电容基本结构和特性
- 讨论电容的不同种类
- 分析电容串联
- 分析电容并联
- 分析直流电路中的电容特性
- 分析交流电路中的电容特性
- 讨论一些电容应用
- 测试电容

主要术语

- 电容
- 电介质
- 法拉(F)
- 库仑定律
- *RC* 时间常量
- 容抗
- 瞬时功率
- 有功功率
- 无功功率
- 伏安特性
- 冲击电压

技术实践

在技术实践中，将会探讨用电容如何实现电压信号源和放大器的连接。同时也会分析如何通过示波器波形处理扩音器。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

13.1　基本电容

在这一节中，将主要探讨电容的基本结构和特性。

学习完本节后，读者应该能够：

- 描述一个电容的基本结构和特点

- 解释电容如何存储电荷
- 给出电容的定义以及说明单位
- 描述库仑定律
- 解释电容如何存储能量
- 讨论额定电压温度系数
- 解释电容泄漏
- 详细说明物理特性是如何影响电容的

13.1.1 基本结构

简单而言，电容器就是两个平行的导体中间夹有绝缘物质——电介质所构成的电子元件。连接线连接到两个平行板上。一个基本的电容如图13.1(a)所示，符号如图13.1(b)所示。

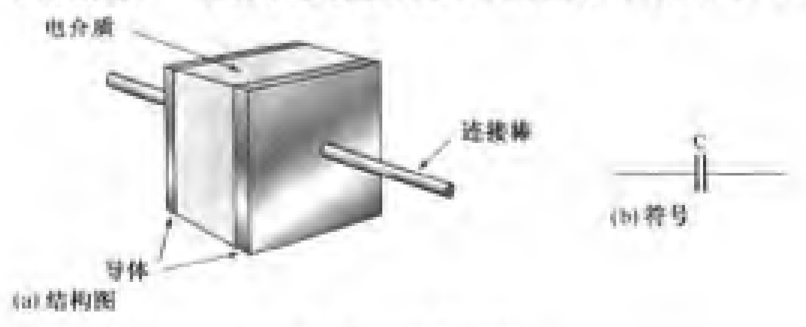


图13.1 基本电容

13.1.2 电容如何存储电荷

如图13.2(a)所示，电容的两块金属板上带有等量的自由电荷。如图13.2(b)所示，电容通过电阻与电压源连接时，电荷(负电荷)从 A 板移动，等量的电荷聚集在 B 板。由于 A 板失去电子，B 板得到电子，因此 A 板带正电。在这个充电过程中，电子只是在连接线和电源之间流动，并没有电子通过电容的绝缘物质，因为其绝缘特性起作用。当电容电压等于电源电压时，电子停止运动，如图13.2(c)所示。如果电容与电压源断开连接，所带电荷仍会保持很长一段时间(时间长短取决于电容的类型)，两端仍存在电压，如图13.2(d)所示。已充电的电容相当于一个临时电源。

13.1.3 电容容量

电容容量是指单位电压接在电容两端时电容所能存储电荷的数量，记做 C。即电容容量是电容存储电荷能力的量度。一个电容在单位电压F所能存储的电荷越多，容量就越大，用以下公式表示：

$$C = \frac{Q}{V} \tag{13.1}$$

其中 C 代表电容，Q 代表电量大小，V 代表电压。

式(13.1)变形后可得到以下两种形式：

$$Q = CV \tag{13.2}$$

$$V = \frac{Q}{C} \tag{13.3}$$

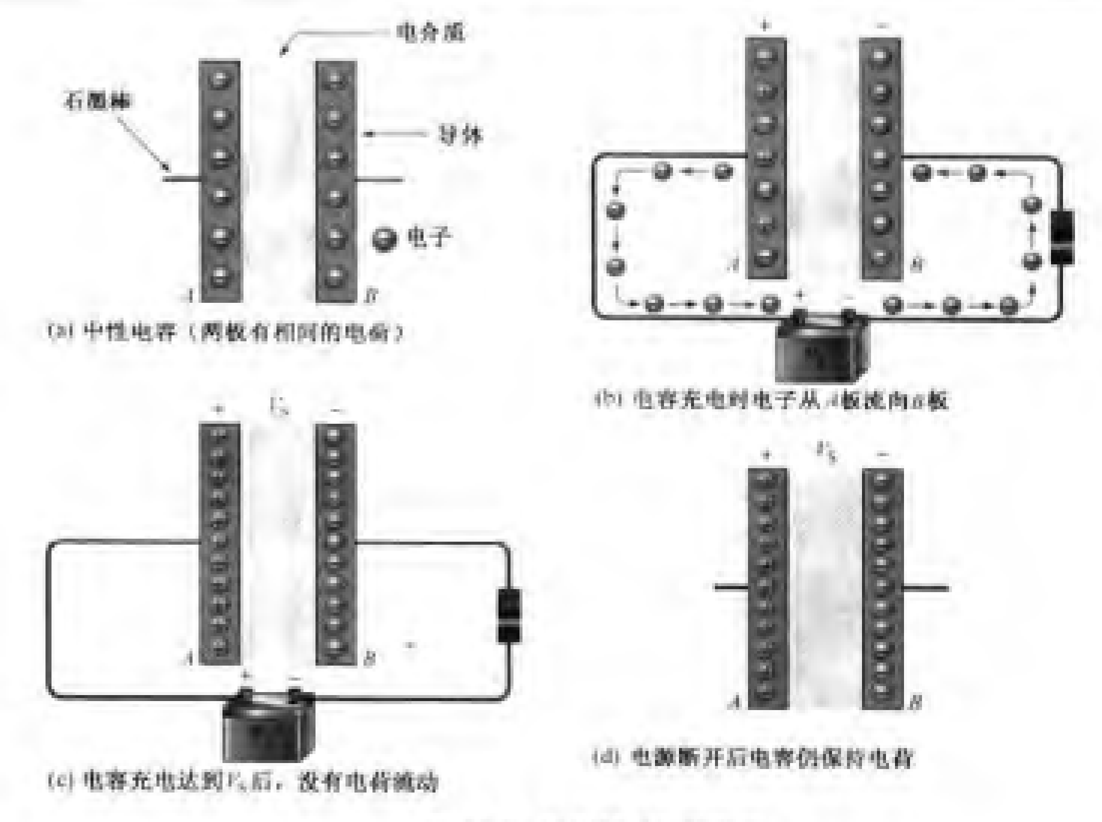


图 13.2 电容储存电荷图解

电容的单位 法拉(F)是电容的基本单位。库仑(C)是电量的基本单位。

一法拉是电容单位，指一库仑电荷电量储存在带有一伏电压的极板上。

电子学中电容多数都用微法和皮法来表示。一微法(μF)是百万分之一法拉($1\ \mu F = 1\times10^{-6}$ F)，一皮法(pF)是万亿分之一法拉($1\ pF = 1\times10^{-12}$ F)法。微法和皮法之间的转换参见表 13.1。

表 13.1 法、微法和皮法之间的转换

从以下单位	转换到	移动十进制小数点
法	微法	向右移动 6 位($\times10^{6}$)
法	皮法	向右移动 12 位($\times10^{12}$)
微法	法	向左移动 6 位($\times10^{-6}$)
微法	皮法	向右移动 6 位($\times10^{6}$)
皮法	法	向左移动 12 位($\times10^{-12}$)
皮法	微法	向左移动 6 位($\times10^{-6}$)

例 13.1 (a) 某电容存储 50 μC 的电量，两板间加 10 V 电压，用 μF 表示的该电容是多少？

(b) 电容容量为 2.2 μF，加 100 V 电压，所能存储的电荷是多少？

(c) 一个 1000 pF 电容，存储了 20 微库(20 μC)的电量，确定其两端电压是多少？

解：(a) $C = \dfrac{Q}{V} = \dfrac{50\ \mu C}{10\ V} = \mathbf{5\ \mu F}$

(b) $Q = CV = (2.2\ \mu F)(100\ V) = \mathbf{220\ \mu C}$

(c) $V = \dfrac{Q}{C} = \dfrac{20\ \mu C}{1000\ pF} = \mathbf{20\ kV}$

练习：如果 $C = 1000$ pF 和 $Q = 100\ \mu$C，确定 V。

例 13.2 把下列数值转换成 µF。

(a) 0.000 01 F (b) 0.0047 F (c) 1000 pF (d) 220 pF

解：(a) $0.000\,01\ \text{F} \times 10^6\ \mu\text{F/F} = \mathbf{10\ \mu F}$ (b) $0.0047\ \text{F} \times 10^6\ \mu\text{F/F} = \mathbf{4700\ \mu F}$

(c) $1000\ \text{pF} \times 10^{-6}\ \mu\text{F/pF} = \mathbf{0.001\ \mu F}$ (d) $220\ \text{pF} \times 10^{-6}\ \mu\text{F/pF} = \mathbf{0.000\,22\ \mu F}$

练习：把 47 000 pF 转换成 µF。

例 13.3 把下列数值转换成 µF。

(a) 0.1×10^{-8} F (b) 0.000 022 F (c) 0.01 µF (d) 0.0047 µF

解：(a) $0.1 \times 10^{-8}\ \text{F} \times 10^{12}\ \text{pF/F} = \mathbf{1000\ pF}$

(b) $0.000\,022\ \text{F} \times 10^{12}\ \text{pF/F} = \mathbf{22 \times 10^6\ pF}$

(c) $0.01\ \mu\text{F} \times 10^6\ \text{pF}/\mu\text{F} = \mathbf{10\,000\ pF}$

(d) $0.0047\ \mu\text{F} \times 10^6\ \text{pF}/\mu\text{F} = \mathbf{4700\ pF}$

练习：把 100 µF 转换成 pF。

13.1.4 电容如何存储能量

电容是以电场的形式存储能量的。电场由两块带有反向电荷的导体板形成，正负板之间用电力线描述，并且和电介质有关，如图 13.3 所示。

库仑定律描述：

两个点电荷之间的库仑力和两个电荷电量的大小成正比，和两个电荷之间距离的平方成反比。

关系描述如下：

$$F = \frac{kQ_1Q_2}{d^2} \tag{13.4}$$

这里 F 代表力的大小，单位是牛顿。Q_1 和 Q_2 代表电量的大小，单位是库仑。d 是两个电荷之间的距离，单位是米。k 是常量，值为 9×10^9 牛顿－米^2/库仑^2。

图 13.4(a)描述了正负点电荷之间的电力线，图 13.4(b)描述金属板上大量反向电荷产生的电力线，在电介质内形成能够存储能量的电场。

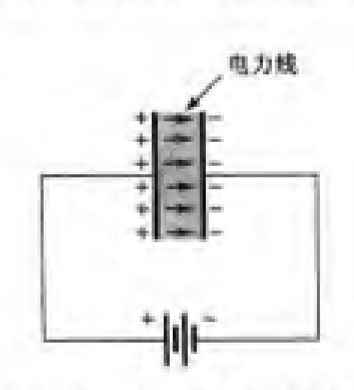




图 13.3 电容以电场的形式存储能量

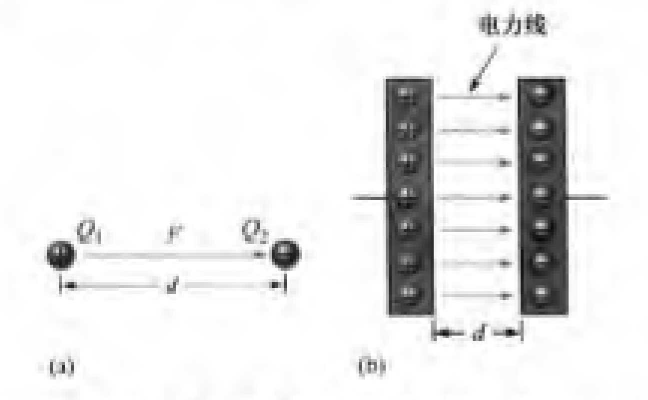


图 13.4 正负点电荷之间的电力线

电容两极板上电荷之间的力越强，所存储的能量就越大。因此，所存储能量的多少和电容大小成正比，因为存储的电荷越多，电场力就越大。

同样，从式(13.2)可以看出，电荷的多少和电压也有关。因此，存储能量的多少也取决于电容两极板之间电压的平方。电容能量计算公式如下：

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \tag{13.5}$$

其中,电容(C)的单位是法拉,电压(V)的单位是伏特,能量(W)的单位是焦尔。

13.1.5 额定电压

每个电容两极板上所能承受的电压都有一个极限值。额定电压描述了器件不受损坏的情况下所能承受的最大直流电压大小。这个最大电压通常叫做击穿电压或者工作电压,如果超过这个电压值,会导致电容烧毁。

电容应用在电路中时,同时应该考虑电容容量和额定电压。所用电容大小的选择和电路要求有关。在应用中,额定电压通常大于电路的最大电压值。

介电强度 电容的击穿电压是由所使用电介质材料的介电强度决定的。介电强度用 V/mil(1 mil = 0.001 in)表示。表 13.2 列出了几种材料的常用值。材料组成不同,介电强度的值也就不同。

表 13.2 一些常见电介质材料及其介电强度

材料	介电强度(V/mil)
空气	80
油	375
陶瓷	1000
(蜡)纸	1200
聚四氟乙烯	1500
云母	1500
玻璃	2000

电场强度可以用下面的例子来解释。假设电容两极板之间的距离是 1 米,因为介电强度是 1000 V/mil,则电容所能承受的最大电压是 1000 V。如果超过最大电压,电介质烧毁,电容导电,则导致电容损坏。同理,如果电容两极板之间的距离为 2 米,那么击穿电压就是 2000 V。

13.1.6 温度系数

温度系数描述了电容值随温度变化的大小和方向。正温度系数是指电容容量随着温度的升高而增大,随着温度的降低而减小。负温度系数是指电容随着温度的升高面减小,随着温度的降低面增大。

温度系数通常用 ppm/℃表示。例如一个 1 μF 的电容,温度系数为150 ppm/℃,表示温度每升高一度,电容增加 150 pF(1 μF 等于一百万 pF)。

13.1.7 泄漏

任何一种材料都不是完全绝缘的。任何电容的电介质材料都会带有一定量的电荷,因此电容上的电荷最后会泄漏。有些种类的电容,例如大型电介质类型的,比其他电容更容易泄漏。图 13.5 所示为一个非理想状态下的电容等效电路。

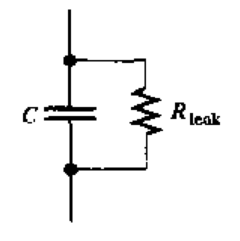


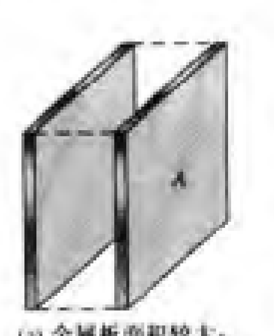
图 13.5 非理想状态下的电容等效电路

13.1.8 电容的物理特性

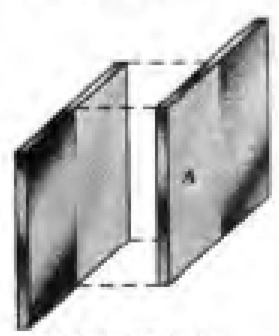
下列参数对决定电容器的电容容量以及额定电压都很重要：金属板面积、两板距离和介电常数。

金属板面积 电容大小和两金属板相对面积成正比。面积越大，电容就越大，面积越小，电容就越小。图13.6(a)所示两平行金属板的相对面积就是每块金属板的面积。如果金属板相对另一块金属板移动，如图13.6(b)所示的重叠面积为有效面积。这种有效面积是计算电容的依据。

两板距离 电容大小和两金属板之间的距离成反比。两板间距离用 d 表示，如图13.7所示。由图可见两板间距离越大电容越小。以前曾提到，击穿电压和两板之间的距离有关，两金属板间的距离越大，击穿电压就越大。

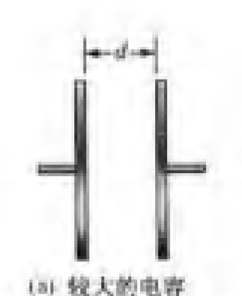


(a) 金属板面积较大：电容较大



(b) 金属板面积减少：电容减小

图13.6 电容大小和金属板面积大小成正比



(a) 较大的电容



(b) 较小的电容

图13.7 电容大小和两金属板之间的距离成反比

介电常数 如上所述，金属板之间的绝缘物质叫做电介质。电介质能使在给定电荷量的情况下减少两极板之间的电压，电容量增大。如果电压是定值，中间充满电介质时能存储的电荷比没有电介质时要多。材料对电场能力大小的量度叫做介电常数或相对介电常数，用 ε_r 表示。

电容大小和介电常数成正比。真空的介电常数为1，空气的介电常数接近1。其他材料的介电常数均以真空的介电常数为参数，其他材料的介电常数值和真空情况下是不同的。例如，在其他条件相同的情况下，充满电介质介电常数 ε_r 等于8的材料的电容大小为电介质是真空的电容的8倍。

表13.3里列出了几种常见的电介质材料的介电常数。这些值会因使用材料的不同而发生变化。

表13.3 一些常见电介质材料及其介电常数

材料	典型 ε_r 值
空气(真空)	1.0
聚四氟乙烯	2.0
(蜡)纸	2.5
油	4.0
云母	5.0
玻璃	7.5
陶瓷	1200

介电常数(相对介电常数)没有单位,因为它是一个相对数值。ε_r 即是材料的绝对介电常数 ε 与真空介电常数 ε_0 的比值,如以下公式所描述:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{13.6}$$

其中,ε_0的取值为 8.85×10^{-12} F/m(法拉每米)。

13.1.9 在物理方面有关电容的公式

已知电容与金属板面积的大小 A 和介电常数ε_r 成正比,与两块金属板的距离 d 成反比。公式如下:

$$C = \frac{A\varepsilon_r(8.85\times10^{-12}\ \text{F/m})}{d} \tag{13.7}$$

其中,A 的单位是平方米,d 的单位是米,C 的单位是法拉。真空的绝对介电常数 ε_0 为 8.85×10^{-12} F/m,绝对介电常数 ε 由式(13.6)得:

$$\varepsilon = \varepsilon_r(8.85\times10^{-12}\ \text{F/m})$$

例 13.4 电容两平行金属板的面积是 0.01 平方米,距离是 0.02 米,确定电容是多少。已知电介质是云母,介电常数为 5.0。

解: 用式(13.7):

$$C = \frac{A\varepsilon_r(8.85\times10^{-12}\ \text{F/m})}{d} = \frac{(0.01\ \text{m}^2)(5.0)(8.85\times10^{-12}\ \text{F/m})}{0.02\ \text{m}} = \mathbf{22.1\ pF}$$

练习: 已知 $A=0.005\ \text{m}^2$, $d=0.008$ m,电介质为陶瓷,求 C。

13.1 节练习

1. 定义电容。
2. (a) 一法等于多少 μF?
   (b) 一法等于多少 pF?
   (c) 一 μF 等于多少 pF?
3. 把 0.0015 μF 转换成 pF,再转换成法。
4. 0.01 μF 的电容,加上 15 V 电压,能存储多少焦耳的能量?
5. (a) 如果电容器的两金属板面积增加,电容值增加还是减少?
   (b) 如果两金属板之间的距离增大,电容值增加还是减少?
6. 电介质为陶瓷的电容,两金属板间的距离为 10 密耳,其击穿电压为多少?
7. 电容金属板总面积为 $0.2\ \text{m}^2$,电介质厚度为 0.005 m。电容大小为多少 μF?
8. 一个 2 μF 电容在 25 ℃时温度系数为 50 ppm/℃。当温度升高到 125 ℃时电容值是多少?

13.2 电容种类

无论是极性电容还是非极性电容,通常根据电介质的类型来分类。最常用的电介质材料有云母、陶瓷、氧化膜、电介材料(氧化铝或者氧化钽)。本节中,将会讲解不同种类的电容特性、结构以及容量大小。

学完本节以后,读者应该能够:

- 论述不同种类的电容
- 描述云母、陶瓷、氧化膜以及电解电溶的特点
- 描述电容的不同种类
- 识别电容标签

13.2.1　固定电容

云母电容　两种常见的云母电容为箔片云母和镀银云母。箔片云母的基本组成如图 13.8 所示，是由薄云母片和箔片交替重叠组成的。箔片为极板，交替连接在一起是为了增大极板的面积，从而增大电容量。层数越多，金属片越大，电容就越大。云母/箔片层用一种类似酚醛塑料的绝缘物质压缩在一起，如图 13.8(b)所示。镀银云母电容是通过把镀银云母片简单排列形成的。

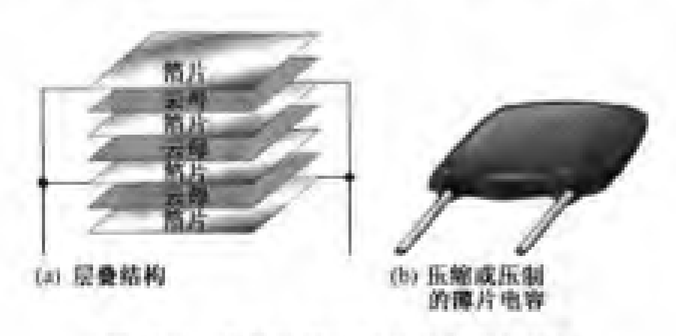


图 13.8　常见石墨电极云母电容的结构

云母电容的取值范围可由 1 pF 到 0.1 μF，额定电压范围在直流 100 V 到 2500 V 之间。通常温度系数在 – 20 ppm/℃到 + 100 ppm/℃之间。云母的介电常数为 5。

陶瓷电容　陶瓷电介质的介电常数很大(通常为 1200)。因此，即使物理尺寸很小，也会得到很大的电容值。陶瓷电容通常是把陶瓷片(如图 13.9 所示)或者多层石墨构造(如图 13.10 所示)，或者无铅陶瓷片(如图 13.11 所示)包在导电板的表面构成的。

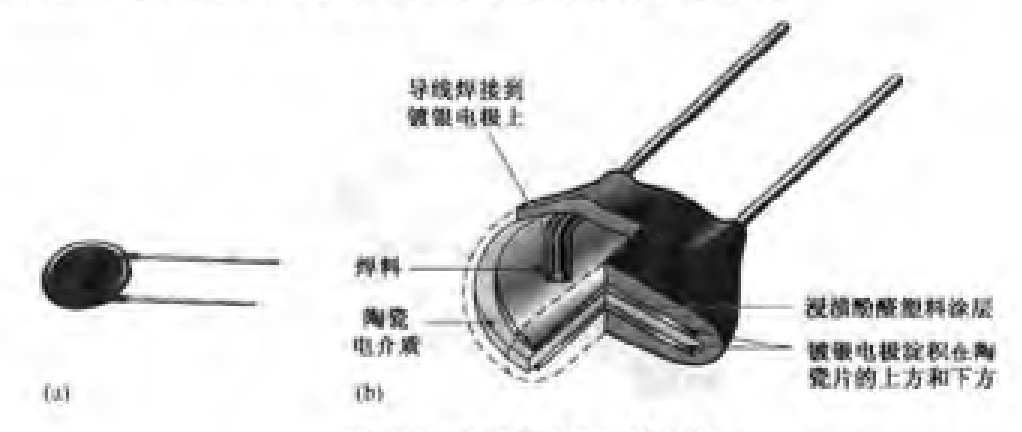
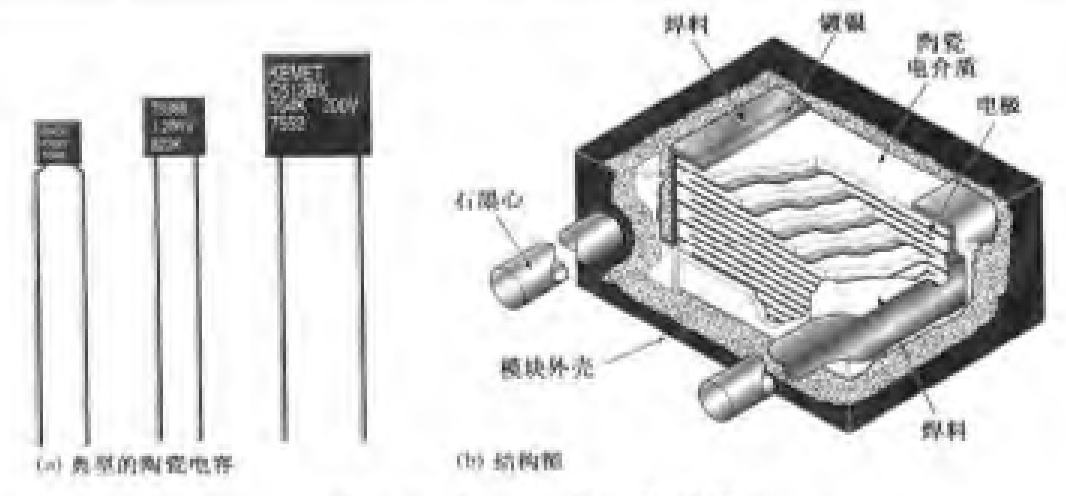


图 13.9　陶瓷电容及其基本结构

典型陶瓷电容器的有效电容一般为 1 pF 到 2.2 μF，有效电压最高为 6 kV。其典型温度系数为 200 000 ppm/℃。而特殊盘状陶瓷的温度系数为 0。

塑料氧化膜电容　塑料氧化膜电容有好几种，如聚碳酸酯、丙烯、聚苯乙烯、聚丙烯等，其中聚脂薄膜是比较常用的电介质材料。有些材料的电容能达到 100 μF。



(a) 典型的陶瓷电容　　(b) 结构图

图 13.10　典型的陶瓷电容和结构图

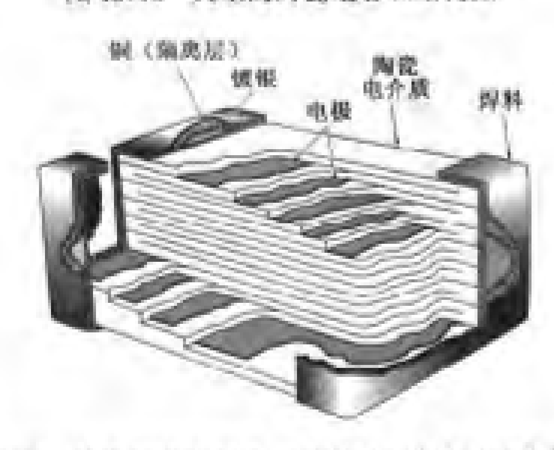


图 13.11　包在印刷电路板表面的典型陶瓷片电容结构图

图 13.12 为一般塑料氧化膜电容的基本结构。两个金属片中间是一个起绝缘作用的薄片，其中一根导线与里面的板相连，另一根导线与外面的板相连。薄片卷成螺旋形，然后密封在模型中。这样，大的金属板可以形成小体积而同时具有大的电容值。另外一种方式是将金属直接沉淀放射到电介质上形成绝缘层。

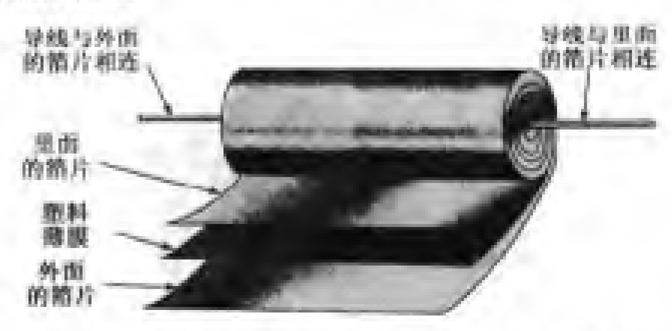
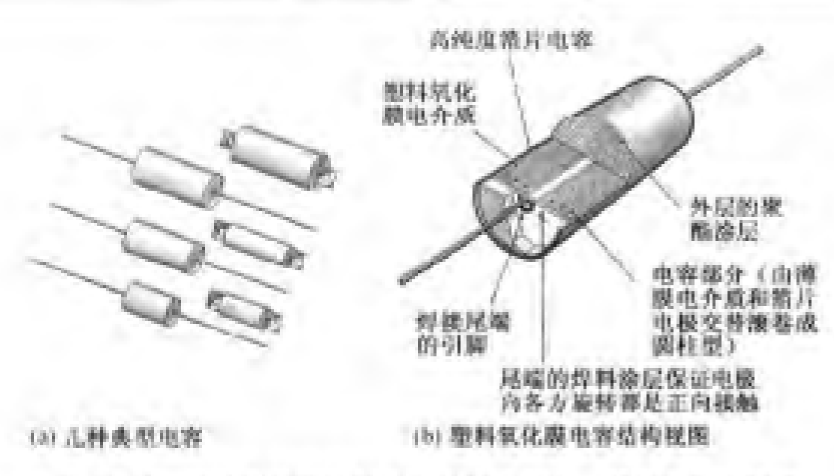


图 13.12　轴向管状塑料氧化膜电容的基本结构

图 13.13(a)所示为典型的塑料氧化膜电容。图 13.13(b)为其中一种塑料氧化膜电容的内部结构图。

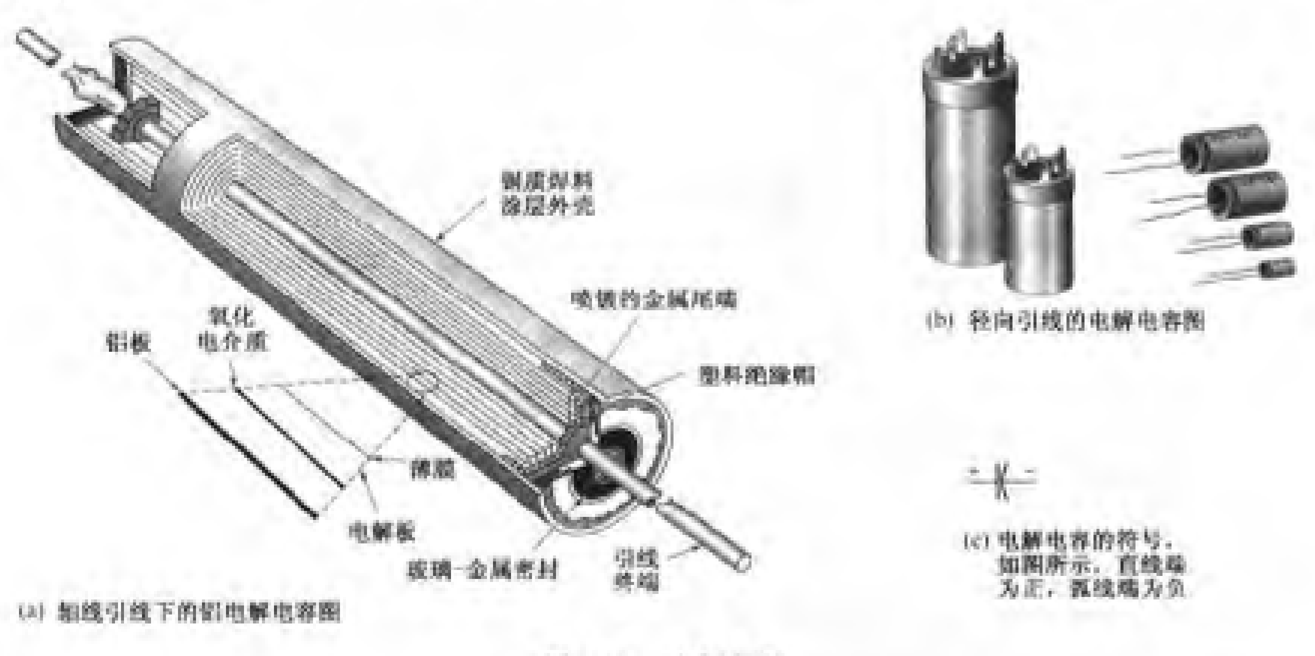
电解电容　电解电容都经过极化使得一块板为正极，另一块为负缎。这种电容的电容值为 1 μF 到高于 200 000 μF，但是其击穿电压很低(350 V 为典型最大值)，而且会有大量泄漏。在这种情况下，电容值为 1 μF 或 1 μF 以上的电容常被极化。



(a) 几种典型电容　　(b) 塑料氧化膜电容结构视图

图 13.13 几种典型塑料氧化膜电容及其中一种的内部结构图

电解电容的电容值一般比云母或陶瓷电容高很多，但是相比之下击穿电压就低很多。铝电解是最常用的一种。通常的电容使用简单的两块板，电解形成一块铝金属薄片，另一块使用塑料氧化膜类的可导电解材料。这两块板用铝板表面的一层铝氧化物隔开。图 13.14(a)为轴向引线下的铝电解电容图。图 13.14(b)为径向引线的电解电容图。图 13.14(c)为电解电容的符号表示。



(a) 轴线引线下的铝电解电容图　　(b) 径向引线的电解电容图　　(c) 电解电容的符号，如图所示，直线端为正，弧线端为负

图 13.14 电解电容

钽电解质可以按照图 13.14 所示的轴向形式存在，或者按照图 13.15 所示的“泪滴”状形式存在。在滴状结构中，正极是金属钽的球状物，而不是箔片。钽氧化物形成电介质，阴极为二氧化锰。

由于氧化物电介质的绝缘作用，金属板(铝或者钽)必须是相连的，因此它经常作为金属板的正极。因此所有电解电容都区分极性。正极通常用正号或者其他明显的标志标明，并且要连接到直流转换电路中，加在电容两端的电压不改变极性。电压极性颠倒会导致电容彻底损坏。

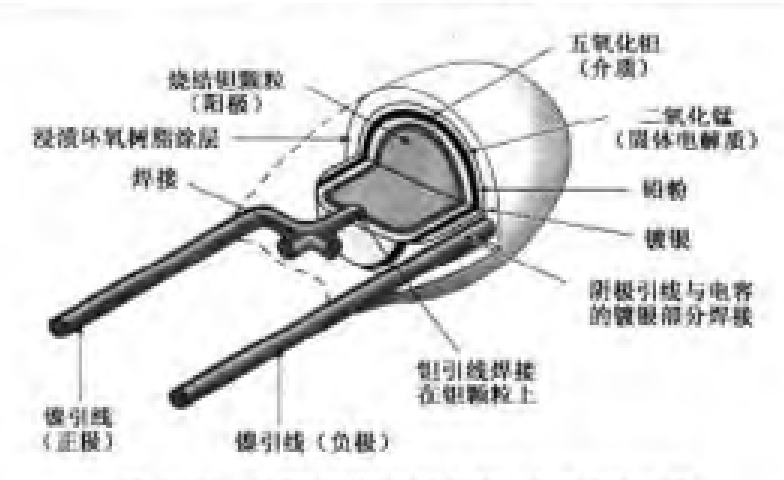


图 13.15　典型"泪滴"状钽电解质电容的结构图

13.2.2　可变电容

当电路中需要手动或者自动调整电容大小时会用到可变电容，例如收音机或者电视的调频道。可变电容的符号如图 13.16 所示。

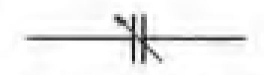


图 13.16　可变电容的符号

可变电容通常有旋转轴，用来非常精细地调整电容，用在整流电路中，称做微调电容。在这些电容中常用的介质为陶瓷或者云母，通常通过调整两金属板的有效覆盖面积来调整电容的大小。一些常见器件如图 13.17 所示。

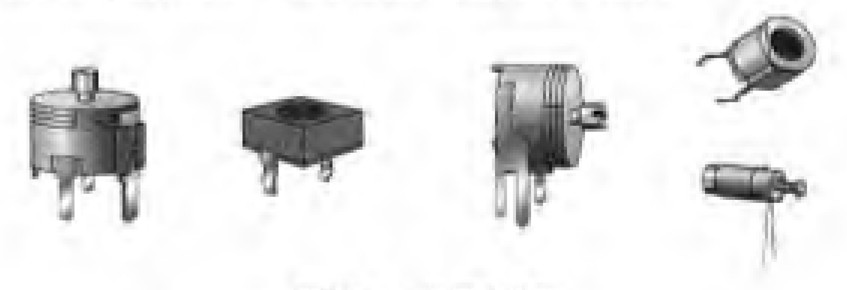


图 13.17　微调电容器

变容二极管是一种电容特性随加在二极管两端的电压变化的半导体装置，通常用于电子设备的信号源线路中。

13.2.3　电容分类

电容值是由电容器上的印制标签和色条码确定的。印制标签由字母和数字组成，标明了各种参数，如电容量、额定电压和误差量。有的电容容量大小没有指定单位。

在这种情况下，要根据给出的具体电容值由经验判断出单位来。例如，陶瓷的电容器数量级在 0.001 和 0.01 之间的，要用单位 μF。因为 pF 这么小的值是不可用到的。又如，陶瓷电容器电容值为 50 或 330 的，单位应为 pF。因为 μF 单位太大了，这种类型的电容器在这种情况下是不可能得到的。在一些情况下，电容值也用 3 位数字表示，前两个数字表示电容数值的数字，第三个表示第二个数字后面的 0 的个数。例如，103 表示 10 000 pF。在一些情况下单位要用 pF 或者 μF。有时候 μF 也表示成 MF 或者 MFD。

额定电压在有些类型的电容器中通常用 WV 或者 WVDC 表示，而在其他类型的电容器中 WV 和 WVDC 则被省略。省略时，额定电压可以根据厂商提供的信息来确定。电容器的误差通常用百分率来标注，如 ±10%。温度系数通常用 1/1 000 000 来标注。这种类型的标注由一个 P

或者 N 后面跟着一个数字组成。如 N750 表示的是负温度系数 750 ppm/℃,P30 表示正温度系数 30 ppm/℃。NP0 表示的指定意义是正负系数是 0,即电容不会因为温度改变而变化。特定类型的电容标有色条码。有关印制标签和色条码的信息,请参见附录 D。

13.2 节练习

1. 用一种方法对电容器进行分类。
2. 固定电容和可变电容之间的区别是什么?
3. 哪种类型的电容会有极性的区分?
4. 在电路上安装需要区别极性的电容时需要注意些什么?

13.3 串联电容

本节将会介绍为什么串联电容总的电容值小于串联电容中任意一个电容的电容值。

学习完本节后,读者应该能够:

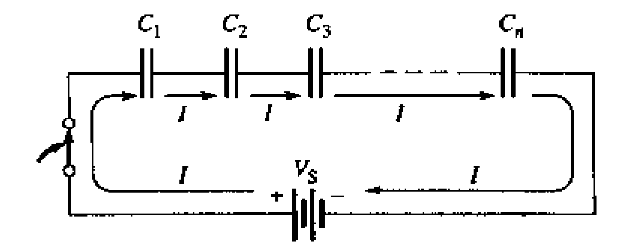
- 分析串联电容
- 确定总的电容值
- 确定电容电压

13.3.1 总电容

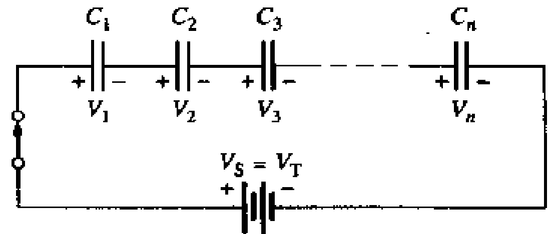
电容以串联方式连接的时候,总电容小于串联电容中最小的电容值,因为金属板的有效距离增加了。串联电容器总电容的计算和计算并联电阻的总电阻十分相似。

考虑通常状态下的电路如图 13.18(a)所示,包括 n 个串联的电容、一个电源和一个开关。开关闭合的时候,电容通过电路进行充电。由于是串联电容,所以电流处处相等。因为电流表示电荷流动的速度,每个电容所储存的电量等于总电荷数。表达式如下:

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots = Q_n \tag{13.8}$$



(a) 串联电容,电流处处相等,$I = Q/t$



(b) 所有电容储存的电荷相等且 $V = Q/C$

图 13.18 串联电容电路

下面,通过基尔霍夫电压定律,每个充电电容的两端电压之和等于总电压 V_T,如图 13.18(b)所示。用等式表达如下:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n$$

从式(13.3),即 $V = Q/C$ 可知,用每一个表达式代替电压时,可以得到以下结果:

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3} + \cdots + \frac{Q_n}{C_n}$$

因为每个电容所带电荷相等，Q 可以消掉，结果为：

$$\frac{1}{C_T}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\cdots+\frac{1}{C_n} \tag{13.9}$$

将式(13.9)的两边同时取倒数，可得到串联电容总电容的表达式，如下：

$$C_T=\frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\cdots+\frac{1}{C_n}} \tag{13.10}$$

切记：

串联电容总电容的大小通常小于串联各电容的最小值。

两个电容串联　当串联电路中只有两个电容时，式(13.9)可以转化为以下形式：

$$\frac{1}{C_T}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}=\frac{C_1+C_2}{C_1C_2}$$

等式左右两边同时取倒数，可以得到两个电容串联时总电容的表达式：

$$C_T=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2} \tag{13.11}$$

串联等效电容　式(13.9)可以变形为另一种形式。当各个电容的值都相同并且等于 C 时，公式变形为：

$$\frac{1}{C_T}=\frac{1}{C}+\frac{1}{C}+\frac{1}{C}+\cdots+\frac{1}{C}$$

右侧各式相加，得：

$$\frac{1}{C_T}=\frac{n}{C}$$

其中 n 是大小相等的电容的个数。两边同时取倒数，得：

$$C_T=\frac{C}{n} \tag{13.12}$$

即各值相等的电容串联以后的总电容大小等于每个电容大小除以电容个数。

例 13.5　确定图 13.19 中 A 和 B 之间总电容的大小。

A　C_1 10 μF　C_2 4.7 μF　C_3 8.2 μF　B

图 13.19

解：用式(13.10)：

$$C_T=\frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}=\frac{1}{\frac{1}{10\ \mu F}+\frac{1}{4.7\ \mu F}+\frac{1}{8.2\ \mu F}}=\mathbf{2.30\ \mu F}$$

练习：如果一个 4.7 μF 的电容和三个如图 13.19 所示的电容串联，C_T 是多少？

例 13.6　计算图 13.20 中的总电容 C_T 是多少？

解：用式(13.11)：

$$C_T = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} = \frac{(100\ \text{pF})(330\ \text{pF})}{430\ \text{pF}} = \mathbf{76.7\ pF}$$

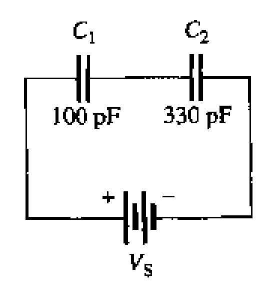


图 13.20

也可以用式(13.10)：

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{100\ \text{pF}} + \frac{1}{330\ \text{pF}}} = 76.7\ \text{pF}$$

练习：如图 13.20 所示，已知 $C_1 = 470$ pF，并且 $C_2 = 680$ pF，计算总电容 C_T 是多少？

例 13.7 计算图 13.21 所示串联电容的总电容 C_T 是多少？

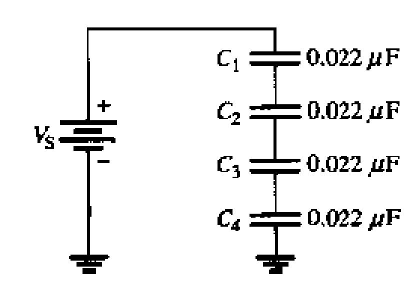


图 13.21

解：由于 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C$，用式(13.12)：

$$C_T = \frac{C}{n} = \frac{0.022\ \mu\text{F}}{4} = \mathbf{0.0055\ \mu F}$$

练习：如果图 13.21 所示各电容的电容值加倍，则总电容 C_T 是多少？

13.3.2 电容的电压

充电的电容串联连接起分压器的作用。经过串联的电容的电压与电容值成反比，如公式 $V = Q/C$ 所示。经过串联的任何电容的电压可由下列公式确定。

$$V_x = \left(\frac{C_T}{C_x}\right)V_T \tag{13.13}$$

其中，C_x 为串联的任何电容(例如 C_1，C_2 或 C_3)，V_x 为经过 C_x 的电压，V_T 为经过各电容的总电压。推导如下：由于串联的任何电容上的电荷与总电荷相同($Q_x = Q_T$)，而 $Q_x = V_xC_x$ 并且 $Q_T = V_TC_T$，则：

$$V_xC_x = V_TC_T$$

求解 V_x 得：

$$V_x = \frac{C_TV_T}{C_x}$$

串联的最大值电容其电压最小，最小值的电容其电压最大。

例 13.8 计算图 3.22 中每个电容两端的电压。

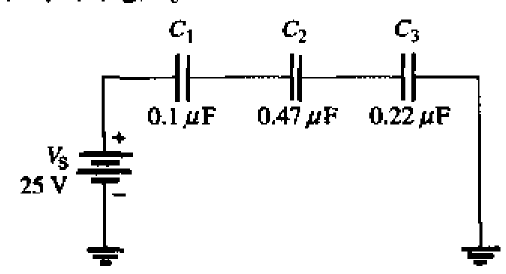


图 13.22

解：计算总电容。

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{0.1\ \mu\text{F}} + \frac{1}{0.47\ \mu\text{F}} + \frac{1}{0.22\ \mu\text{F}}$$

$$C_T = 0.06\ \mu\text{F}$$

从图 13.22 中可知，$V_S - V_1 = 25$ V。因此，用式(13.13)计算电容两端的电压：

$$V_1 = \left(\frac{C_T}{C_1}\right)V_T = \left(\frac{0.06\ \mu F}{0.1\ \mu F}\right)25\ V = \mathbf{15.0\ V}$$

$$V_2 = \left(\frac{C_T}{C_2}\right)V_T = \left(\frac{0.06\ \mu F}{0.47\ \mu F}\right)25\ V = \mathbf{3.19\ V}$$

$$V_3 = \left(\frac{C_T}{C_3}\right)V_T = \left(\frac{0.06\ \mu F}{0.22\ \mu F}\right)25\ V = \mathbf{6.82\ V}$$

练习：另一个 0.47 μF 的电容串联到图 13.22 所示的电路中，确定这个电容两端的电压，假设开始时所有电容都没有充电。

13.3 节练习

1. 串联电容的总电容大小是小于还是大于所有电容中的最小值？
2. 将电容 100 pF，220 pF 和 560 pF 串联在一起，总电容是多少？
3. 一个 0.01 μF 和一个 0.015 μF 的电容串联在一起，计算总电容 C_T。
4. 5 个 100 pF 的电容串联在一起，C_T 是多少？
5. 计算图 13.23 中电容 C_1 两端的电压值。

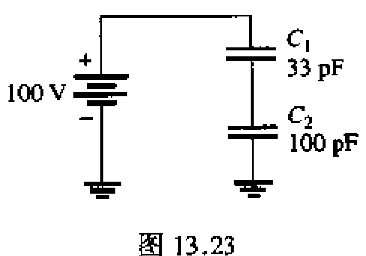


图 13.23

13.4 并联电容

本节将介绍为什么以并联方式连接电容时电容值将会增加。

学完本节读者应该能够：

- 分析并联电容
- 计算总电容值

电容以并联的方式连接时，总电容值就是各个单独电容的电容值总和，原因是金属板的有效面积增加了。电容并联方式下总电容值的计算和串联电阻总电阻值的计算很相似。

考虑图 13.24 中开关闭合时将出现什么情况。从电源流出的电荷在并联支路的交汇点开始分开。在每个并联支路中存在着独立的电流，因此不同的电荷可以储存在每个电容中。根据基尔霍夫电流定律，各支路流动的电流总数等于总电流，所以在每条电容中的电荷总和就等于总电荷数。同样，每条并联支路上的电压相等。根据上面的结果可以推导出 n 个电容并联的情况下总电容的计算公式如下：

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots + Q_n \tag{13.14}$$

根据式(13.2)，即 $Q = CV$，将这一关系全部代入式(13.14)中的每项，得到下式：

$$C_TV_T = C_1V_1 + C_2V_2 + C_3V_3 + \cdots + C_nV_n$$

由于 $V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n$，所以电压为公因数可以约去，得：

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n \tag{13.15}$$

式(13.15)是一般情况下并联电容总电容的计算公式，其中 n 代表并联电容的数目。

电容并联时，总电容等于各个电容的总和。

各个电容均相等并为 C 时，总电容为电容个数 n 乘以电容量 C：

$$C_T = nC \tag{13.16}$$

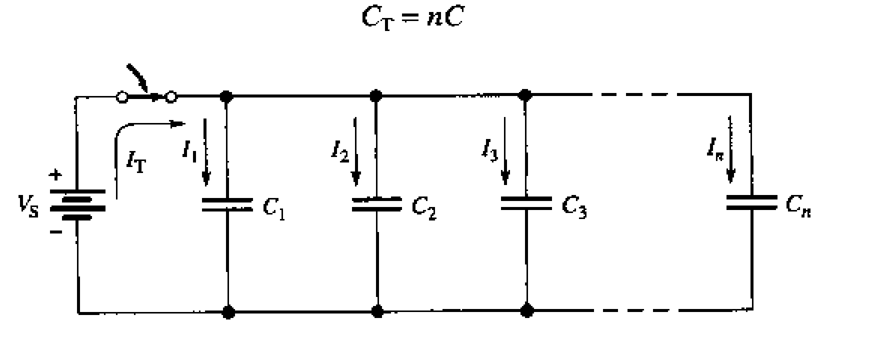


图 13.24 并联电容电路

例 13.9 图 13.25 中的总电容是多少？每个电容两端的电压是多少？

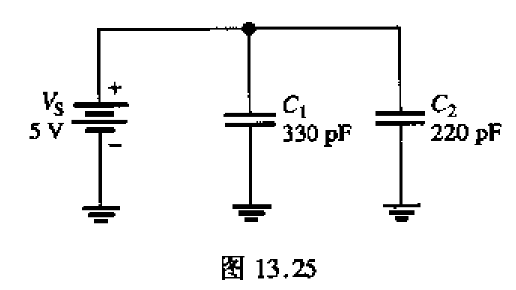


图 13.25

解：总电容为：

$$C_T = C_1 + C_2 = 330\text{ pF} + 220\text{ pF} = \mathbf{550\text{ pF}}$$

并联电容的每个电容两端的电压等于电源电压。

$$V_S = V_1 = V_2 = \mathbf{5\text{ V}}$$

练习：假设一个 100 pF 的电容和图 13.25 中 C_2 并联后的 C_T 是多少？

例 13.10 计算图 13.26 中的 C_T 值。

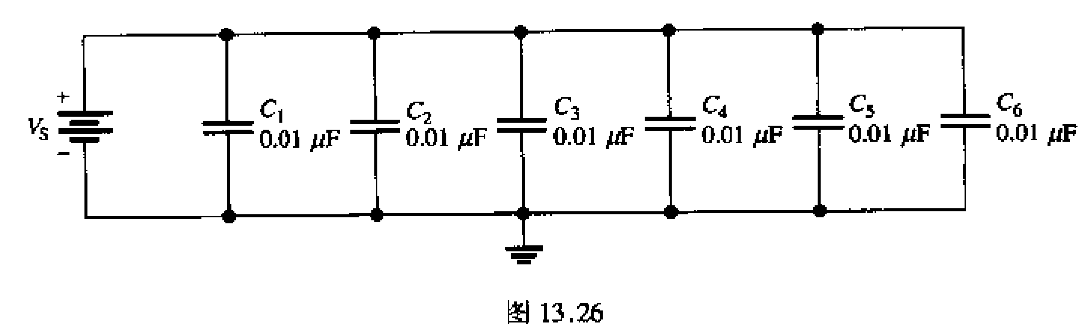


图 13.26

解：6 个相等的电容并联，所以 $n = 6$。

$$C_T = nC = (6)(0.01\ \mu\text{F}) = \mathbf{0.06\ \mu F}$$

练习：如果一个 0.01 μF 的电容连接在图 13.26 中的电容上，总电容大小是多少？

13.4 节练习

1. 如何计算并联电容的总电容？
2. 在某一场合下，需要 0.05 μF 的电容，但只有大量 0.01 μF 的电容。问如何能够得到所需要的电容。
3. 将电容 10 pF，56 pF，33 pF 和 68 pF 并联在一起，C_T 是多少？

13.5 直流电路中的电容

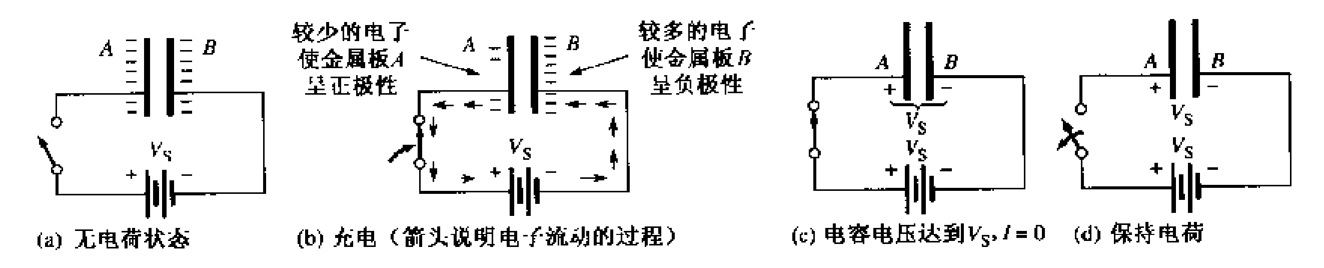
将电容器连接到直流电源时电容将被充电。金属板上在某一时刻积累的电荷数取决于电路中电容和电阻的值。

学完本节之后读者应该能够：

- 分析带有电容的直流转换电路
- 描述一个电容器的充电和放电
- 定义 RC 时间常数
- 叙述时间常数和一个电容器的充电放电关系
- 写出充电放电的曲线方程
- 解释为什么电容器能够隔直流

13.5.1 电容器充电

电容接入直流电源时将会充电，如图 13.27 所示。电容器在图 13.27(a)中并未充电。这时金属板 A 和金属板 B 上带有相同数量的自由电子。开关闭合以后如图 13.27(b)所示，电源上的自由电子从金属板 A 出发通过电路流向金属板 B。由于金属板 A 失去电子而金属板 B 得到电子，所以金属板 A 和金属板 B 之间出现电势差。随着这种状况继续发展，金属板之间的电压不断增大，直到和提供的电压 V_S 相等，但是极性相反。如图 13.27(c)所示，当电容器电压达到 V_S 时电路中没有电流。



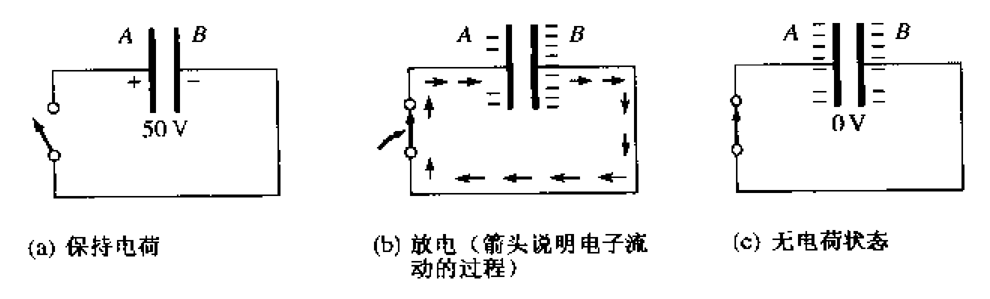
(a) 无电荷状态 (b) 充电（箭头说明电子流动的过程） (c) 电容电压达到V_S，$I=0$ (d) 保持电荷

图 13.27 电容器充电

如果充过电的电容器与电源隔离，如图 13.27(d)所示，电容器将长时间保持这种充电状态，保持时间的长短取决于泄漏电阻的大小。充电发生在电解电容器上比在其他电容器上泄漏得要快。

13.5.2 电容器放电

将一根金属丝连到一个充过电的电容器上时，如图 13.28 所示，电容器将要放电。在这种特殊的情况下，一根低电阻的金属丝用开关连到电容器上。在开关闭合之前，电容器已经充上 50 V 的电压，如图 13.28(a)所示。开关闭合时金属板 B 上多余的电子通过电路向金属板 A 移动(如箭头所示)；电流流过低阻抗的电路，电容上的电能释放。两块金属板上的自由电子重新平衡时，电荷中和。这时，电容电压为 0，电容放电完毕，如图 13.28(c)所示。



(a) 保持电荷 (b) 放电（箭头说明电子流动的过程） (c) 无电荷状态

图 13.28 将一个充电的电容器放电

13.5.3　充放电过程中的电流和电压

注意图 13.27 和图 13.28 中放电电流与充电电流相反。在充放电过程中，没有电流通过电容板，因为它是一个绝缘体。电流只从外部电路中经过。

图 13.29(a)显示了一个电容、电阻、开关和电源的串联回路。开始时开关打开，电容没有充电，伴随电容电压为 0。开关关闭的瞬间，电流最大，电容开始充电。由于电容电压为 0，等于短路，电流开始时最大；并且电流只受限于电阻。随着时间变化，电容充电，电流减小，电压(V_C)增大。在充电的过程中，电阻上的电压与电流成正比。

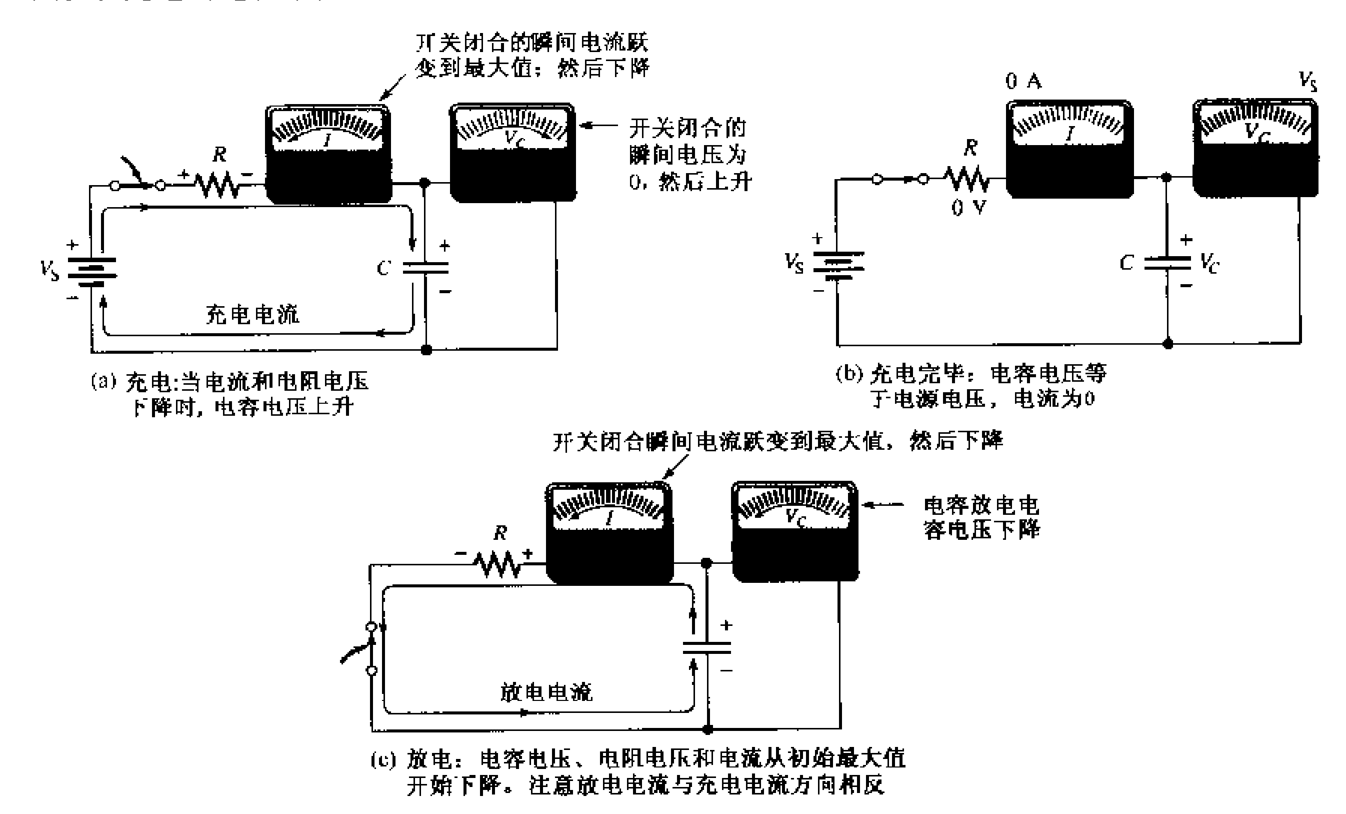


图 13.29　电容充放电过程中的电流和电压

一段时间之后，电容充电完毕。这时电流为 0，电容电压与电源电压相等，如图 13.29(b)所示；如果这时开关打开，电容保持全部电荷(忽略泄漏)。

图 13.29(c)中去掉了源电压。开关关闭时，电容放电。开始时电流最大，但与充电时的方向相反。随着时间变化，电流和电容电压减小。电阻电压始终与电流成正比。电容放电完毕时，电流和电容电压为 0。

在直流电路中电容上的电压变化规则为：

1. 电容电压不会立刻改变。
2. 理想情况下，电容电流可以突变。
3. 电流不变时，已充电电容相当于开路。
4. 电流瞬间改变时，未充电电容相当于短路。

接下来讨论在电容回路中，电压和电流的变化情况。

13.5.4 *RC* 时间常数

实际电路中不存在没有电阻的电容。总会有导线小电阻、戴维南等效源电阻或等效电阻。因此,电容充放电特性总和与其连接的电阻有关。在电容充放电过程中,电阻引入了时间因素。

电容通过电阻充放电时,完成充放电需要一定的时间。由于电子移动需要一定的时间,因此电容上的电压不会立即变化。电容充放电的速度由 *RC* 时间常数决定。

串联 *RC* 回路的时间常数是一个与电阻和电容量乘积相等的时间间隔。

电阻用欧姆表示,电容用法拉表示时,时间常数是用秒来表示的,记做 τ(希腊字母),公式为:

$$\tau = RC \tag{13.17}$$

以前介绍过 $I = Q/t$。电流决定于给定时间内流过的电子。电阻增大时,充电电流减小,因此充电时间增加。电容量减小时,充电量减小;因此,对于相同的电流,充电时间增加。

例 13.11 一 *RC* 串联电路中的电阻为 1.0 MΩ,电容为 4.7 μF,时间常数是多少?

解: $\tau = RC = (1.0\times10^{6}\ \Omega)(4.7\times10^{-6}\ \text{F}) = \mathbf{4.7\ s}$

练习: 一 *RC* 串联电路中的电阻为 270 kΩ,电容为 3300 pF,时间常数是多少?

电容充电或者放电时,在时间常数间隔的电容器上的电荷变化大约是总电荷变化的 63%。

在一个时间常数间隔内,一个没有充电的电容电压为充满电荷的 63%。当一个电容放电时,在一个时间常数间隔内,电压下降到原电压的大约 100% − 63% = 37%,变化了 63%。

13.5.5 充电放电曲线

电容充电放电曲线不是线性变化的,如图 13.30 所示。图中说明了在每个时间单位常数内完全充电的大致比例。这种曲线遵循精确数学公式,叫做指数曲线。充电曲线是升幂函数曲线,放电曲线是降幂函数曲线。电压变化 100%时需要 5 个时间常数的时间。这 5 个时间常数通常为电容完全充电或者放电的时间,叫做暂态时间。

通式 对于直流电路充放电的指数曲线,常用上升或下降曲线的瞬时电压或者瞬时电流表示,通常表达式如下:

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau} \tag{13.18}$$

$$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-t/\tau} \tag{13.19}$$

V_F 和 I_F 为电压和电流的最终值,V_i 和 I_i 是电压和电流的初始值。小写斜体字母 i 和 v 是电容在时刻 t 的电流和电压的瞬时值,e 值为 2.71828182846 的对数值。TI-86 计算器上用■,■和■键能容易地实现计算这个指数函数。

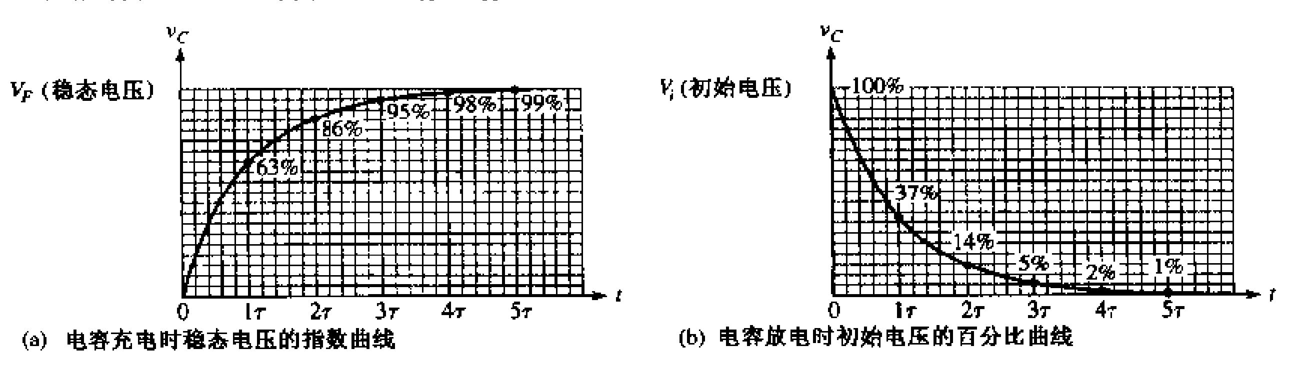


图 13.30 *RC* 电路的充电和放电指数曲线

从零值开始充电　对于这种特殊情况下的计算公式,电压是按指数函数变化的。电压从 0($V_i=0$)开始变化,如图 13.30(a)所示,由式(13.20)给出。该式可从式(13.18)按下面的过程展开:

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau} = V_F + (0 - V_F)e^{-t/RC} = V_F - V_F e^{-t/RC}$$

$$v = V_F(1 - e^{-t/RC}) \tag{13.20}$$

用式(13.20)可以计算充电电容器在任意瞬时的电压。还可以将式(13.20)中的 v 替换为 i,将 V_F 替换为 I_F,从而计算出不断增长的电流。

例 13.12　如图 13.31 所示,求开关闭合 50 μs 以后电容器的电压,电容器在初始时未充电。并画出充电曲线。

解:时间常数 $RC=(8.2\ \text{k}\Omega)(0.01\ \mu\text{F})=8.2\ \mu\text{s}$。电容器终值电压为 50 V(记做 V_F),初始电压为 0。由于 50 μs 小于时间常数,所以电容器电压将小于终值的 63%。

$$v_C = V_F(1 - e^{-t/RC}) = (50\ \text{V})(1 - e^{-50\ \mu\text{s}/82\ \mu\text{s}})$$
$$= (50\ \text{V})(1 - e^{-0.61}) = (50\ \text{V})(1 - 0.543) = \mathbf{22.8\ V}$$

由此可以画出充电曲线,如图 13.32 所示。

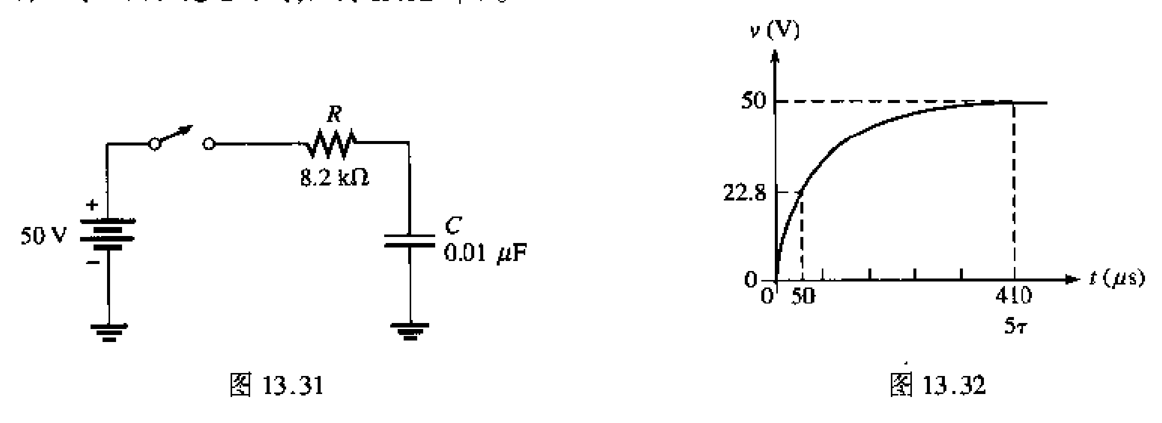


图 13.31　　　　图 13.32

可以用 TI-86 计算器的键输入指数 e 来确定一条指数曲线。

练习:确定图 13.31 中开关闭合后 15 μs 电容器的电压值。

放电至 0　在这种特殊情况下,电容器的电压按指数函数变化终值为 0($V_F=0$),如图 13.30(b)所示,常用公式如下:

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau} = 0 + (V_i - 0)e^{-t/RC}$$

$$v = V_i e^{-t/RC} \tag{13.21}$$

其中,V_i 是开始放电时的电压。可以用这个公式计算任何放电时刻的电压,如例 13.13 所示。

例 13.13　计算图 13.33 中开关闭合后 6 ms 时电容的电压。画出放电曲线。

解:放电时间常数 $RC=(10\ \text{k}\Omega)(2.2\ \mu\text{F})=22\ \text{ms}$。电容电压初始值为 10 V。注意 6 ms 小于一个时间常数,所以电容放电将小于 63%。因此,在 6 ms 时电容电压将大于初始值的 37%。

$$v_C = V_i e^{-t/RC} = (10\ \text{V})e^{-6\ \text{ms}/22\ \text{ms}} = (10\ \text{V})e^{-0.27} = (10\ \text{V})(0.761) = \mathbf{7.61\ V}$$

电容的放电曲线如图 13.34 所示。

练习:在图 13.33 中,将 R 值改成 2.2 kΩ。开关闭合以后 1 ms 时,计算电容器两端的电压。

常用指函数曲线的绘图方法　图 13.35 所示的常用曲线提供了电容充电和放电的图解。例 13.14 说明了绘图方法。

图 13.33

图 13.34

图 13.35 常用指函数曲线

例 13.14 如图 13.36 所示,电容初始时没有电荷,要经过多长时间其电压达到 75 V? 开关闭合以后 2 ms 电容电压是多少? 用图 13.35 所示的常用指函数曲线来求解。

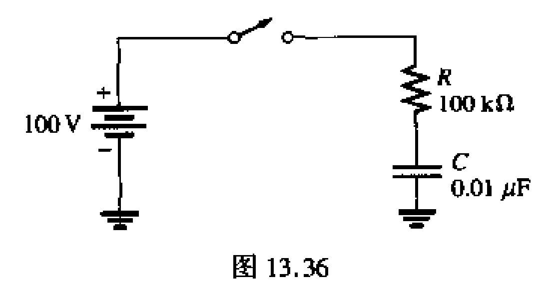


图 13.36

解:电容终值电压为 100 V,该值为纵轴上的 100%(1.0)。75 V 为终值的 75%,即图中的 0.75。从图中可以看出所对应的时间为时间常数的 1.4 倍。本电路中,时间常数为 $RC=(100\ \text{k}\Omega)(0.01\ \mu\text{F})=1\ \text{ms}$。因此,开关闭合以后 1.4 ms 时电容电压达到 75 V。

通过分析常用指函数曲线可知,在 2 ms 时,也就是 2 个单位时间常数时,电容电压大约为 86 V(纵轴 0.86 点处)。图解如图 13.37 所示。

练习:用常用指函数曲线,计算图 13.36 中电容电压要经过多长时间达到 50 V。开关闭合以后 3 ms 电容电压是多少?

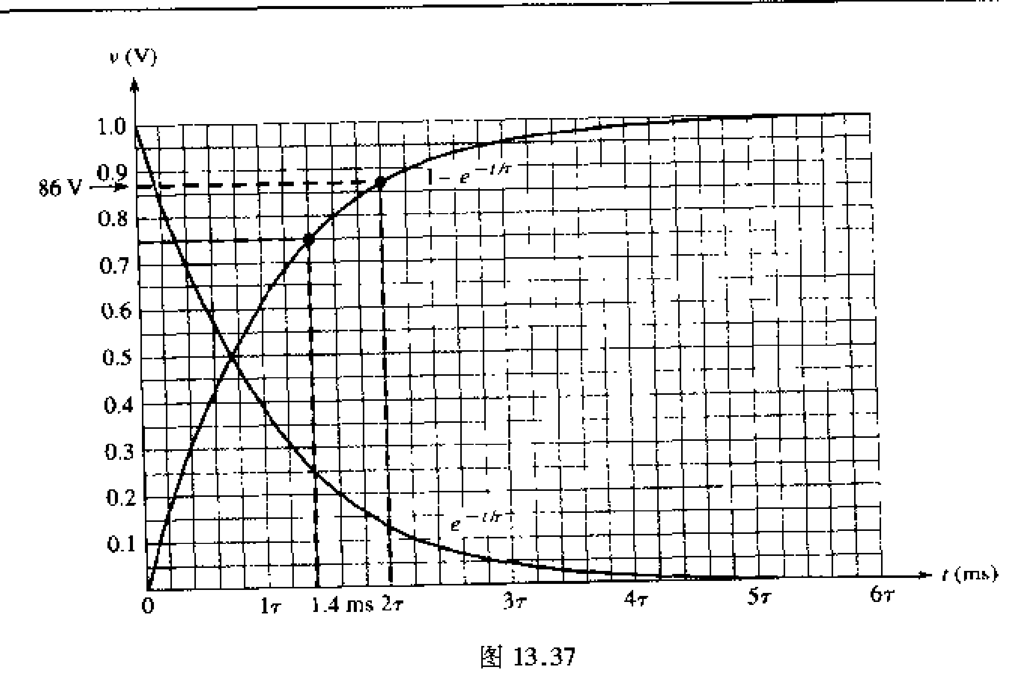


图 13.37

时间常数比例表 每间隔一个单位时间常数后电容充电放电在全值中所占的比例可以通过幂指函数公式计算，也可以通过指函数曲线来计算。结果归纳为表13.4和表13.5。

表 13.4 每间隔一个单位时间常数电容充电电压与稳态值相比所占的百分比

时间常数的个数	电压的过似百分比%
1	63
2	86
3	95
4	98
5	99(可以看成100%)

表 13.5 每间隔一个单位时间常数电容放电电压与初始值相比所占的百分比

时间常数的个数	电压的近似百分比%
1	37
2	14
3	5
4	2
5	1(可以看成0)

13.5.6 计算时间

有时，需要计算在某一电压下电容充电或者放电的时间。在 v 一定的情况下可以利用式(13.18)和式(13.20)计算 t。常用指数 $e^{-t/RC}$ 的指数为 $-t/RC$。因此，将等式两边同时取对数就能计算出时间。$V_F=0$ 时计算过程如下[参见式(13.21)]：

$$v = V_i e^{-t/RC}$$

$$\frac{v}{V_i} = e^{-t/RC}$$

$$\ln\left(\frac{v}{V_i}\right) = \ln e^{-t/RC} \tag{13.22}$$

$$\ln\left(\frac{v}{V_i}\right) = \frac{-t}{RC}$$

$$t = -RC\ln\left(\frac{v}{V_i}\right)$$

也可以用式(13.20)的升幂公式(充电过程)来计算,如下:

$$v = V_F(1 - e^{-t/RC})$$

$$\frac{v}{V_F} = 1 - e^{-t/RC}$$

$$1 - \frac{v}{V_F} = e^{-t/RC}$$

$$\ln\left(1 - \frac{v}{V_F}\right) = \ln e^{-t/RC} \qquad (13.23)$$

$$\ln\left(1 - \frac{v}{V_F}\right) = \frac{-t}{RC}$$

$$t = -RC\ln\left(1 - \frac{v}{V_F}\right)$$

例 13.15 在图 13.38 中,开关闭合以后多长时间电容放电电压达到 25 V?

解:用式(13.22)求放电时间:

$$t = -RC\ln\left(\frac{v}{V_i}\right) = -(2.2\ \text{k}\Omega)(1\ \mu\text{F})\ln\left(\frac{25\ \text{V}}{100\ \text{V}}\right)$$

$$= -(2.2\ \text{ms})\ln(0.25) = -(2.2\ \text{ms})(-1.39) = \mathbf{3.05\ ms}$$

可以利用计算器计算 ln(0.25)的值。按 LN 键,键入 0.25,然后按 ENTER 键即可。

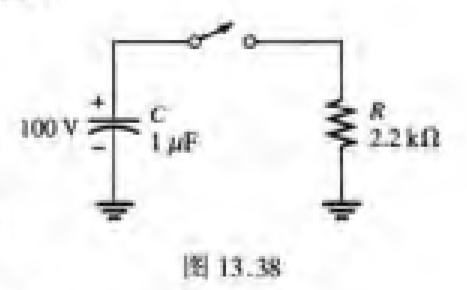


图 13.38

练习:如果图 13.38 中的电容放电,电压达到 50 V 时要经过多长时间?

13.5 节练习

1. $R = 1.2\ \text{k}\Omega$, $C = 1000\ \text{pF}$ 时,时间常数是多少?
2. 如果第 1 题中电路加 5 V 的电压源,电容充满电荷要多长时间?充满电荷以后电容器的电压是多少?
3. 某一电路的时间常数为 1 ms。如果用 10 V 电压源充电,则 2 ms,3 ms,4 ms,5 ms 四个阶段的电容电压是多少?
4. 电容电压为 100 V。若通过一个电阻放电,在 1 个单位时间常数时电容两端的电压是多少?
5. 在图 13.39 中,计算开关闭合以后 2.5 个时间常数时电容两端的电压。
6. 在图 13.39 中,电容充电到 15 V 要经过多长时间?

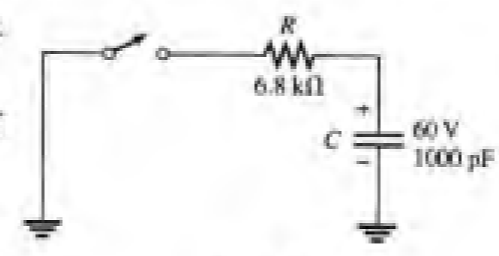


图 13.39

13.6 交流电路中的电容

通过上一节我们已经解到直流电路中的电容。本节将讲解交流电通过电容时要受到阻碍,称为容抗,这与交流电的频率有关。

学完本节,读者应该能够:

- 分析交流电路中的电容

- 解释为什么电容会产生电压与电流的相位偏移
- 给出容抗的定义
- 计算某一给定电路中的容抗值
- 讨论电容瞬时功率、实际功率和无功功率

为了充分理解交流电路中电容的作用，首先介绍电流的概念。为此，引入电荷随时间的瞬时变化量。

我们已知电流是电荷流动的速率。因此，可以认为瞬时电流 i 是电荷 q 随着时间 t 的瞬时变化率。

$$i = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \tag{13.24}$$

$\mathrm{d}q/\mathrm{d}t$ 是 q 的瞬时变化率，电容的瞬时电荷为 $q = Cv$，用微分的基本公式，q 的导数为 $\mathrm{d}q/\mathrm{d}t = C(\mathrm{d}v/\mathrm{d}t)$。因为 $i = \mathrm{d}q/\mathrm{d}t$，所以得到以下等式：

$$i = C\left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\right) \tag{13.25}$$

此公式表明：

电容瞬时电流等于电容值乘以电容两端的电压变化率。

由此得出，电容两端电压变化得越快，电流就越大。在这里引入微分来说明电容电路中电压与电流的相位关系。在本书中，分析电路时不用公式计算微分。

13.6.1 电容两端的电压与电流的相位关系

下面考虑电容两端加上正弦电压后会发生什么情况，如图13.40所示。电压波形通过0点时变化率最大($\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = \max$)，到达顶点时变化率为0($\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = 0$)，如图13.41所示。

根据式(13.25)，能确定电容两端电压和电流的相位关系。当 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = 0$ 时，i 也等于0。因为 $i = C(\mathrm{d}v/\mathrm{d}t) = C(0) = 0$，当 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 达到正向最大值时，i 为正向最大；当 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 达到负向最大值时，i 为负向最大。

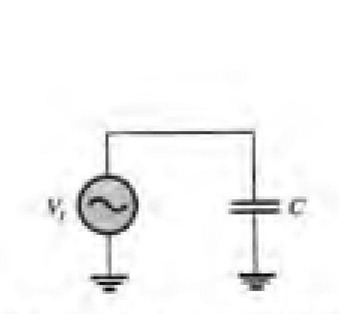


图13.40　加入正弦电压的电容

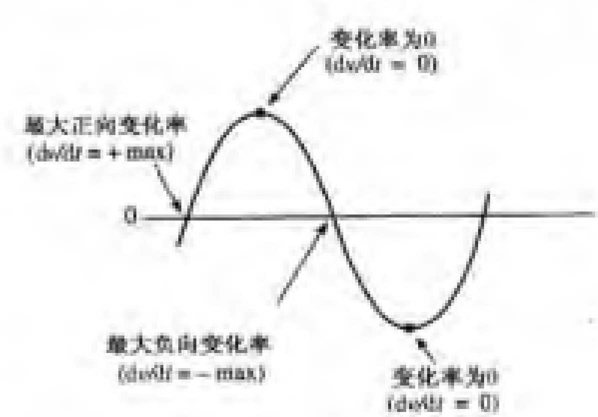


图13.41　电压的变化率

电容电路中，正弦电压产生正弦电流。因此通过电压图中电压各点可以绘出电流的图形，电压最大值时电流等于0。图3.42(a)表明了这种关系。注意电流超前电压90°。在纯电容电路中通常是这样。电压与电流的相位关系如图13.42(b)所示。

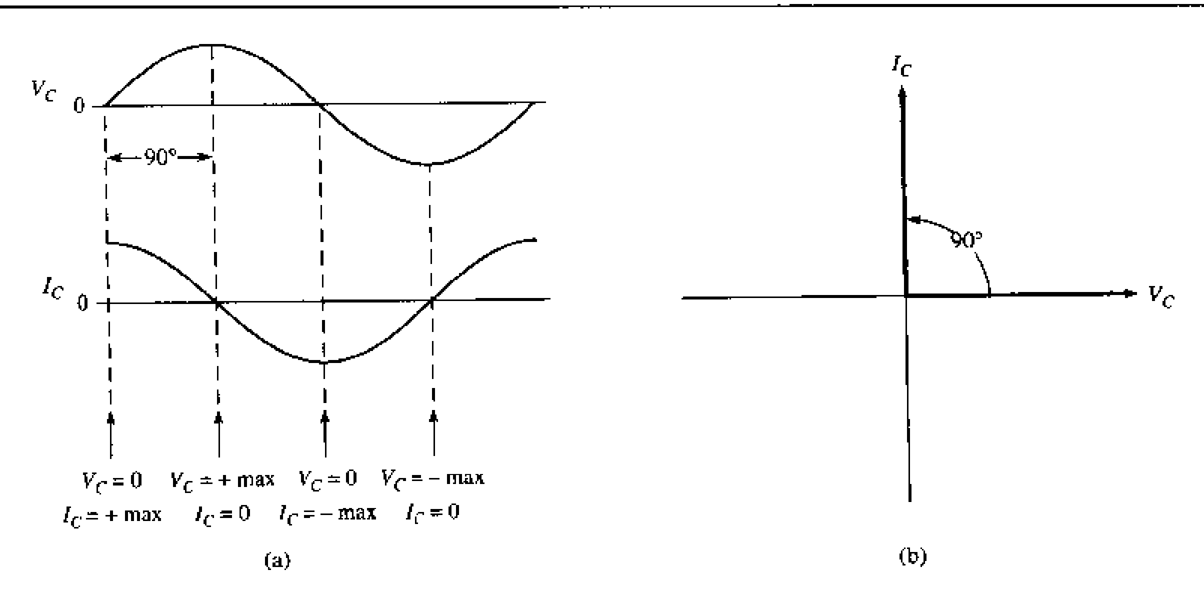


图 13.42 电容的 V_C 和 I_C 的相位关系。电容电流总是超前电压 90°

13.6.2 容抗 X_C

容抗阻碍正弦电流,用欧姆表示。容抗用符号 X_C 来表示。

为了推导 X_C 的表达式,可使用关系式 $i = C(\mathrm{d}v/\mathrm{d}t)$以及参考图 13.43 所示的曲线。电压变化速率和频率有关。频率越高,电压变化就越快。例如,图 13.43 中通过 0 点时正弦曲线 A 的斜率比 B 大。曲线某一点的斜率表明该点的变化速率。由于最大变化速率较大($\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 在 0 点处相对较大),因此正弦曲线 A 的频率大于正弦曲线 B 的频率。

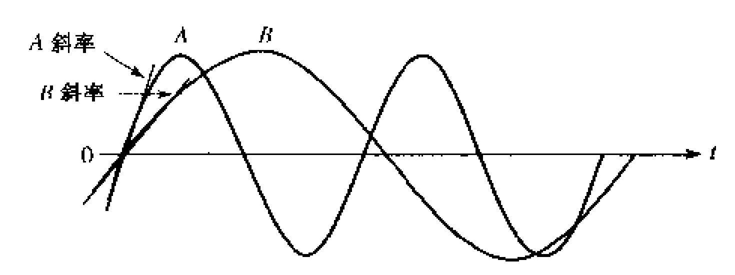


图 3.43 高频信号(A)通过 0 点时有较高斜率,对应于有较高的变化率

当频率增加时,$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 变大,i 就增加。当频率降低时,$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 变小,i 就减小。

$$\overset{\uparrow}{i} = C(\mathrm{d}\overset{\uparrow}{v}/\mathrm{d}t) \quad 并且 \quad \underset{\downarrow}{i} = C(\mathrm{d}\underset{\downarrow}{v}/\mathrm{d}t)$$

i 增加意味着对电流的阻力减小(X_C 减小),i 减小意味着对电流的阻力增大(X_C 增大)。因此,X_C 与 i 成反比,也与频率成反比。

X_C 与$\frac{1}{f}$成反比。

从等式 $i = C(\mathrm{d}v/\mathrm{d}t)$可知,如果 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 是常量而 C 是变量,C 增大则 i 增大,C 减小则 i 减小。

$$\overset{\uparrow}{i} = \overset{\uparrow}{C}(\mathrm{d}v/\mathrm{d}t) \quad 并且 \quad \underset{\downarrow}{i} = \underset{\downarrow}{C}(\mathrm{d}v/\mathrm{d}t)$$

此外,i 增加意味着阻抗减小(X_C 减小),i 减小意味着阻抗增大(X_C 增大)。因此 X_C 与 i 成反比,也与电容成反比。

容抗与 f 和 C 的乘积成反比。

X_C 与 $\frac{1}{fC}$ 成比例。

已经知道了 X_C 与 $1/fC$ 之间的比例关系。现在需要知道计算 X_C 的等式。这个重要公式可见附录 C，描述如下：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \tag{13.26}$$

当 f 的单位是赫兹，C 的单位是法拉时，容抗 X_C 的单位是欧姆。注意 2π 在分母中是一个比例常量。

例 13.16 一正弦电压加在一电容两端，如图 13.44 所示。正弦波的频率为 1 kHz。计算电容容抗是多少？

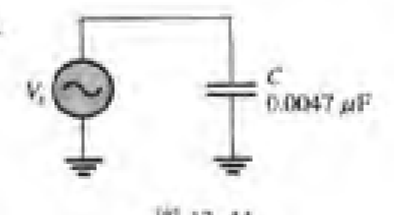


图 13.44

解： $X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1 \times 10^3\ \text{Hz})(0.0047 \times 10^{-6}\ \text{F})} = \mathbf{33.9\ k\Omega}$

练习： 计算图 13.44 中的电容容抗等于 10 kΩ 时需要的频率是多少？

13.6.3 交流电路电容分析

已经知道在纯电容交流电路中电流与电压相位相差 90°。如果电压幅角为 0，可以用 $V_s\angle 0°$ 来表示，相应的电流可以表示为 $i\angle 90°$ 或者 jI，如图 13.45 所示。

图 13.45

欧姆定律适用于包含容抗的交流电路，将欧姆定律中的 R 用 $\mathbf{X}_C$ 代替。欧姆定律应用于图 13.45 中的电路，得到以下结果：

$$\mathbf{X}_C = \frac{V_s\angle 0°}{I\angle 90°} = \left(\frac{V_s}{I}\right)\angle -90°$$

这表明，$\mathbf{X}_C$ 通常在其值的后面有一个大小为 $-90°$ 的角，记做 $X_C\angle 90°$ 或者 $-jX_C$。

例 13.17 计算图 13.46 中的电流。

图 13.46

解： X_C 的大小为：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(10 \times 10^3\ \text{Hz})(0.0056 \times 10^{-6}\ \text{F})} = 2.84\ \text{k}\Omega$$

用极坐标系表示，$\mathbf{X}_C$ 为：

$$X_C = 2.84\angle-90° \text{ k}\Omega$$

根据欧姆定律：

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{X_C} = \frac{5\angle 0° \text{ V}}{2.84\angle-90° \text{ k}\Omega} = 1.76\angle 90° \text{ mA}$$

注意，电流的表达式有90°的相位角，表明与电压的相位相差90°。

练习：将图13.46中的频率改成25 kHz，计算电流。

13.6.4 电容功率

本章曾经提到，已充电的电容会在电场中储存能量。理想电容的电荷不会消失，而是会永久储存。当一个交流电压加在电容两端时，在一个周期的某一时段内能量会储存在电容上，在另一个时段内，储存的能量会转换到电源上。能量并没有消失。图13.47表明电容在一个电压和电流的循环周期内的功率曲线。

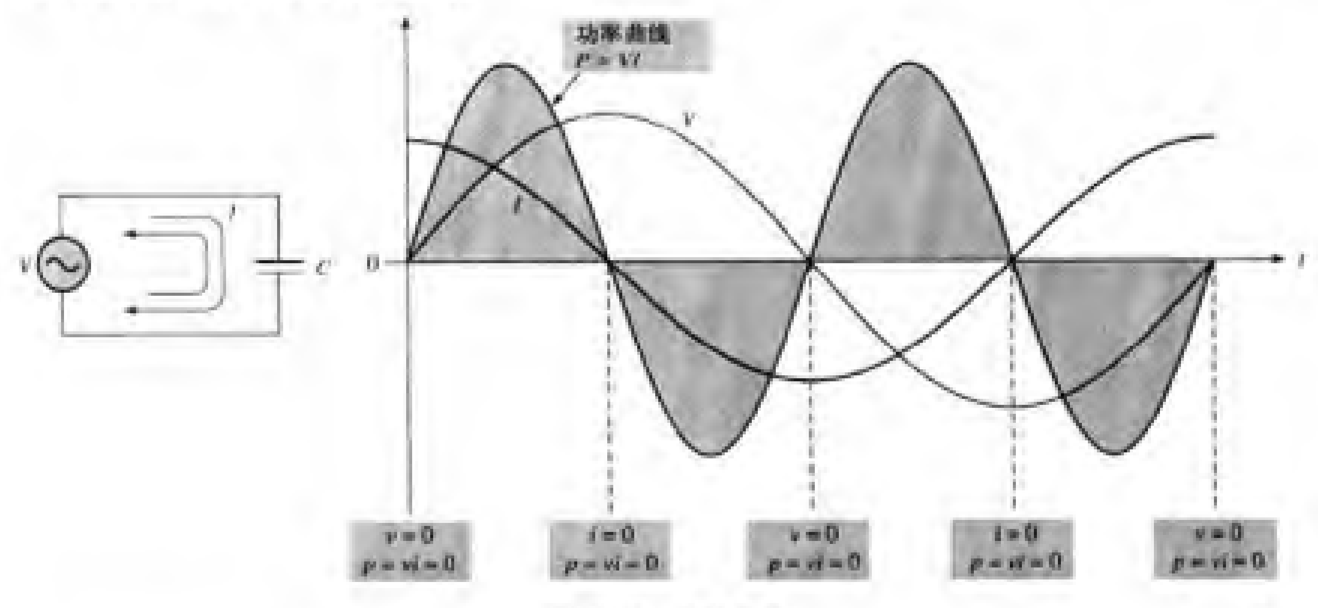


图13.47　功率曲线

瞬时功率(p)　v和i的乘积决定了瞬时功率。当v或者i在0点时，p也为0。当i和v都为正时，p也为正，当v和i一个正一个负时，p为负。当v和i都为负时p为正。可知，功率是随正弦曲线变化的。功率的正值表明电容在储存能量。功率负值表明能量由电容传递给电源。注意能量是存储和释放交替进行的，功率变化的频率是电压或者电流频率的两倍。

有功功率(P_{true})　理想情况下，在功率为正的期间电容器所存储的能量在功率为负的期间全都返回给了电源。没有能量会因为转换成热量而消失，所以有功功率是0。实际上，在实际电容中，由于泄漏和电阻作用，总功率的一小部分会以实际功率的形式消失。

无功功率(P_r)　电容存储或返回能量的速率叫做无功功率。无功功率是非负值，因为在任何时间内电容不是释放能量就是存储能量。无功功率不能反映能量的损失。公式如下：

$$P_r = V_{rms}I_{rms} \tag{13.27}$$

$$P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_C} \tag{13.28}$$

$$P_r = I_{rms}^2 X_C \tag{13.29}$$

注意，这些公式和在第4章介绍电阻功率时的公式形式相似。电压和电容都是用 rms 形式表示的。无功功率的单位是乏(VAR，volt-ampere，reactive)。

例 13.18 计算图 13.48 中的有功功率和无功功率。

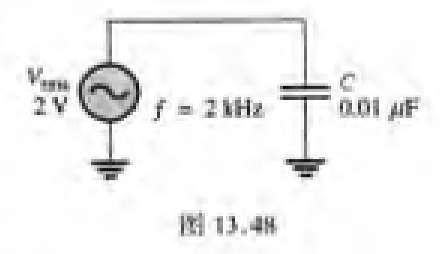


图 13.48

解：理想电容的有功功率 P_{true} 通常是 0。计算无功功率时，首先要计算出容抗的值，然后用式(13.28)计算。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(2\times10^3\ \text{Hz})(0.01\times10^{-6}\ \text{F})} = 7.96\ \text{k}\Omega$$

$$P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_C} = \frac{(2\ \text{V})^2}{7.96\ \text{k}\Omega} = 503\times10^{-6}\ \text{VAR} = \mathbf{503\ \mu VAR}$$

练习：如果图 13.48 中的频率加倍，那么实际功率和无功功率各为多少？

13.6 节练习

1. 叙述电容的电流和电压的相位关系。
2. $f = 5$ kHz，$C = 50$ pF 时计算 X_C。
3. 频率等于多少时 0.1 μF 的电容容抗为 2 kΩ？
4. 计算图 13.49 中的电流。
5. 1 μF 的电容连接在 12 V 的交流电压源上，其实际电功率是多少？
6. 在第 5 题中，计算频率为 500 Hz 时的实际功率。

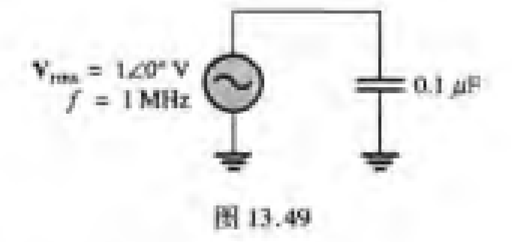


图 13.49

13.7 电容应用

电容广泛应用于电子领域，我们已经讨论过一些应用来表明这部分的作用。

学完本节后读者应该能够：

- 论述一些电容的应用
- 描述稳压电源
- 解释耦合电容和旁路电容的作用
- 讨论电容在调谐电路、时序电路和计算机存储器中的应用

拿起一块电路板，打开电源，或者察看电子设备的内部，会看到各种电容。这些电容在交直流电路中有各种不同的应用。

13.7.1 电的存储

电容的一个最基本应用是诸如计算机某种半导体存储器电路的存储作用。这种特殊应用需要很高的电容值，泄漏可以忽略不计。

存储电容连接在直流电压源的输入端和电路的接地端。电路在正常电压下工作时，电容通过直流电压源充电；当正常电压源损坏时，存储电容就变成电路的电压源。

只要电容充分充电，就能在电路中提供电压和电流。电路中有电流下降时，需要转移和补充电容器的电荷，这就使电压下降。因此，存储电容只能用做临时电压源。电容能够向电路提供有效能量的时间，取决于电容的大小和电路中电流的大小。电流越小电容越高，电容能够向电路提供能量的时间就越长。

13.7.2 稳压电源

基本直流电源是由整流器和滤波器组成的。整流器把 110 V, 60 Hz 的标准输出正弦电压转化成脉冲电压，该电压是半波电压还是全波电压取决于整流电路。如图 13.50(a)所示，半波整流器过滤掉正弦电压负半周期。如图 13.50(b)所示，全波整流器把每个周期的负半波变成了正向。半波和全波整流电压都是直流的，因为尽管发生了改变，但是极性并没有变化。

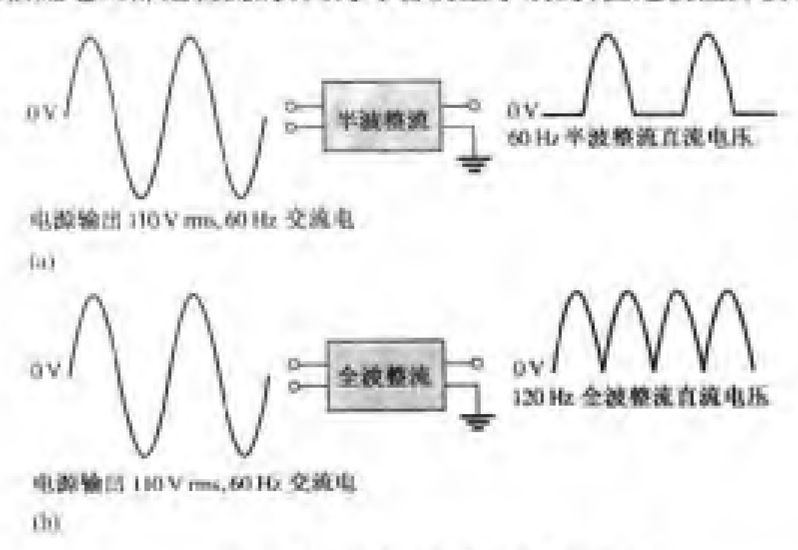


图 13.50 半波和全波整流器的操作

为了在电路中提供能量，整流电压必须转换成直流恒压，因为所有电路都需要持续提供的能量。在整流电压中滤波器几乎滤掉了整流电压中的波动，给负载电路提供了理想的直流恒定电压，如图 13.51 所示。

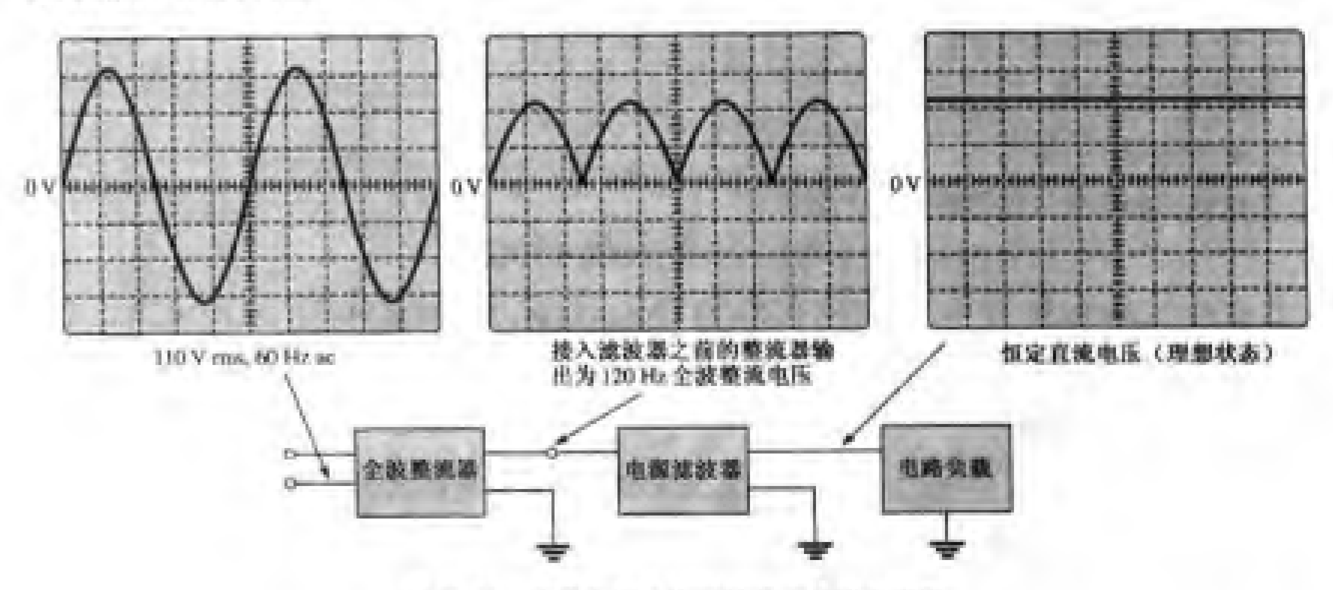


图 13.51 直流电源工作时的基本波形示意图

作为稳压源的电容 因为能够存储电荷，电容在直流电源中也可以作为滤波器使用。图 13.52(a)所示为全波整流器加上滤波电容的直流电源。可描述为如下充电和放电过程。假设电容开始时没有充电，但电源打开整流电压第一个周期时，电容会通过整流器的电阻进行充电。电容电压会跟随整流电压达到最高点。整流电压到达最高点时，电容会通过电阻放电，使

电压开始下降，如图13.52(b)所示。放电量通常都很少，为了阐述方便，在图中放大了。下一个脉动电压会通过补充先前失去的电荷又给电容充电到最大值。只要电源打开，这种形式的充电放电就会持续。

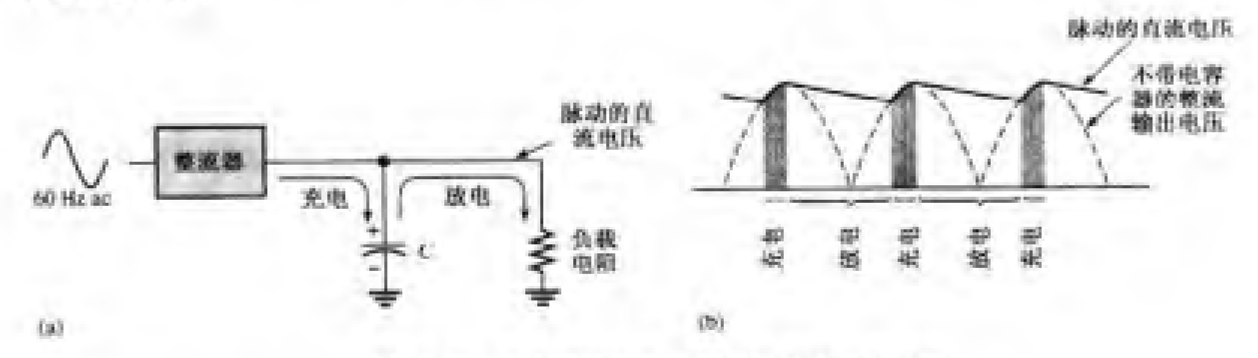


图13.52 加上滤波电容的直流电源的工作原理

整流器设计成只允许电流向给电容充电的方向流动。电容不会给整流器放电但会向高负载电阻补充少量电荷。由电容充放电引发的电压小的被动，称做波动电压。好的直流电源在直流输出时波动很小。由于稳压电源电容的放电时间/常数取决于电容和负载电阻的大小，因此电容的值越大，放电时间越长，波动电压也就越小。

13.7.3 隔直流耦合交流

电容通常用来隔电路中的直流电压。例如在图13.53中，电容连接在放大器1的输出端，作用是阻止放大器1输出的直流电压与放大器2输入端的直流电压相互影响。假设操作正确，放大器1输出的直流电压为0 V，而放大器2输入的直流电压为3 V。电容会阻止3 V的电压影响放大器1的电压保持为0 V，反之亦然。

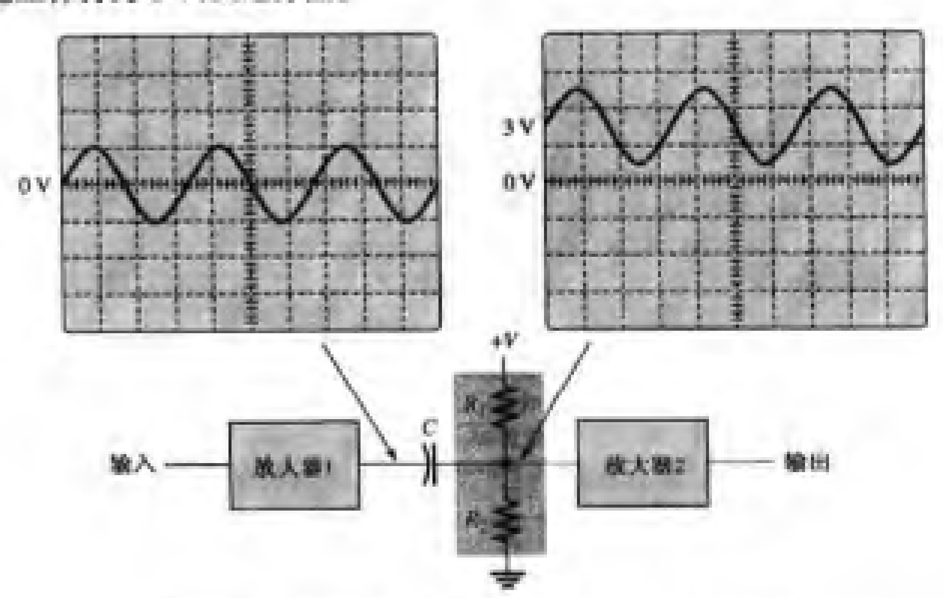


图13.53 放大器中电容隔直流耦合交流的应用过程

如果正弦电压信号加在放大器1的输入端，电压信号增加，直到1的输出端也出现电压信号，如图13.53所示。放大的电压信号通过电容达到放大器2的输入端的两倍。在此叠加了3 V直流电压后经放大器2再放大。为了让电压信号通过电容器而不衰减，电容必须足够大，这

样在信号电压的频率下容抗可以忽略不计。在这种应用中,电容用做耦合电容,对于直流电压看做开路,对于交流电压看做短路。随着信号源的频率减小,电容电抗增加,频率很低时,容抗要足够大,否则在放大器1和放大器2之间对交流电压产生压降。

13.7.4 电源线去耦装置

在电路板上用电容连接在直流电压输出端和地之间,用来耦合多于电压或者数字电路中由于高速开关而引起的毛刺电压。这些电压会影响电路的正常工作。这种去藕装置通过电容在高频时呈现低电阻使这些电压和地短接。几种去藕电容通常接在电路的不同端点。

13.7.5 旁路电容

电容在电路中的另一个应用是旁路电阻上的交流电压,而不影响电阻两端的直流电压。例如,在放大电路中直流电压叫做偏压,用于不同点。为了使放大电路正常工作,偏压必须保持不变,因此不能有任何交流电压。连接偏压电阻和地两端的大电容为交流电压提供了一个到地的低电抗,保证指定点的直流偏压不变。在频率较低时,由于旁路电容容抗增大,旁路作用将减弱。旁路应用可参见图13.54。

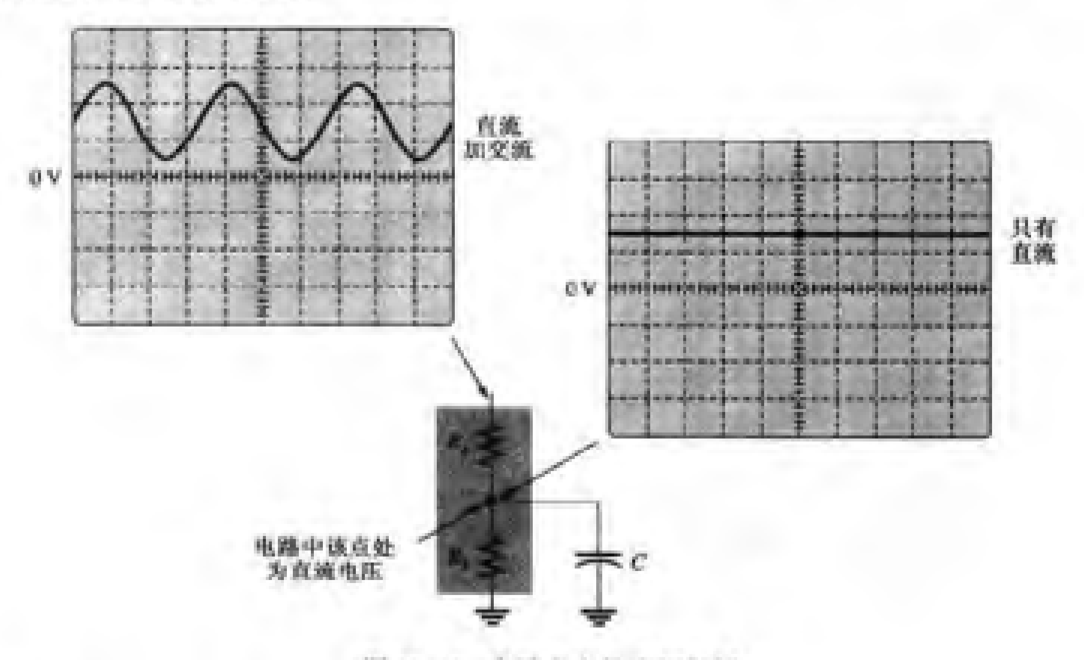


图13.54 旁路电容的应用举例

13.7.6 信号滤波器

电容还用在一类叫做滤波器的电路中,在一系列不同频率的信号中选择某一频率的信号或者某一频带信号而滤去其他信号。这一应用的常见例子是收音机或者电视机,选择所需传送信号而过滤其他发送的信号。

调整收音机或电视机时,实际上是改变调频电路(一种滤波电路)的电容,这样只有所需要的信号能到达接收电路。电容用来和电阻、电感以及其他原件组成滤波器。滤波器将在第19章详细介绍。

滤波电路的特点是能够选择频率,基于电容电抗取决于频率($X_C = 1/2\pi fC$)的原理。

13.7.7 时序电路

电容的另一个重要应用领域是在时序电路中,用来产生时间延迟或者特定波形。由电阻和电容所组成电路的时间常数可以通过选择 R 和 C 值来控制。在各种电路中电容变化的充电时间可以作为基本时间延迟。例如控制汽车转向指示灯的电路,灯能够有规律地交替闪亮熄灭。

13.7.8 计算机存储器

计算机动态存储器用非常微小的电容作为只包含 1 和 0 这两个数字的二进制信息的存储单元。充电电容表示存储 1,放电电容表示存储 0。在具有一组电容电路的存储器中可存储一组二进制数。在计算机或者数字电路原理课程中可以学到这方面的知识。

13.7 节练习

1. 解释半波或者全波整流直流电压是如何通过滤波电容来输出的。
2. 解释使用去耦电容的目的。
3. 耦合电容至少要多大?
4. 解释使用退耦电容的目的。
5. 讨论在选频电路(例如信号滤波电路)中频率和容抗之间关系的重要性。
6. 在时间延迟应用中电容最重要的特点是什么?

13.8 电容测试

电容是非常可靠的器件,在额定电压和适当温度下使用可以延长其使用寿命。本节将介绍几种基本故障类型和检测方法。

学完本节后,读者应该能够:

- 检测电容
- 用欧姆表进行检测
- 解释纵向 *LRC* 表的用处

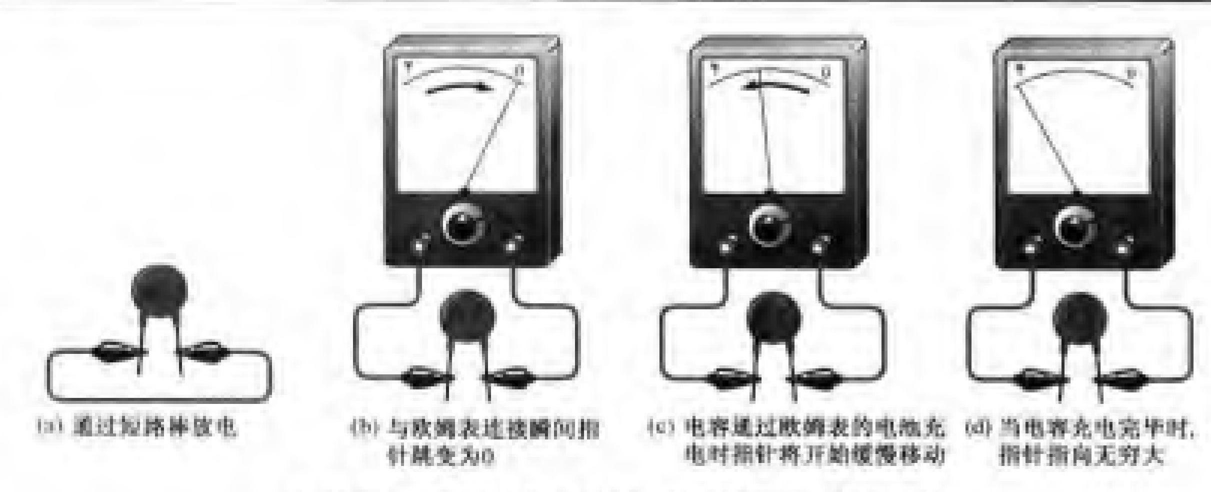
电容故障可以分为两类,即永久性故障和可恢复性故障。永久性故障通常是由于电解质损坏造成的短路,或者连接错误引起的开路。可恢复性故障通常导致泄漏电阻逐渐减小,从而导致泄漏电流增加或者等效串联电阻增加,或者电解质的吸收。

13.8.1 欧姆表检测

有疑问时,可以把电容从电路中拆下来用欧姆表检测。首先,保证电容已经放电,如图 13.55(a)所示。把欧姆表与电容相连,置在高挡如 ×1M 挡,如图 13.55(b)所示,观察指针。初始值应显示接近 0 欧姆,电容通过欧姆表的电池充电时指针将开始转向高电阻的那一端,如图 13.55(c)所示。电容充满电荷时,欧姆表将会显示确切的电阻值,如图 13.55(d)所示。

电容通过欧姆表的电池充电,欧姆表能反映充电电流。电容值越大,充电就越慢,这表现在指针的偏转上。电容很小时,欧姆表会很快地实现快速充电这一过程。

如果电容内部短路,欧姆表将指向零并停在那里不动。如果泄漏,指针读数将会比实际的小。多数电容会有几百兆欧的容抗。但电解电容是特例,其容抗通常小于 1 兆欧。如果电容断开,将检测不到充电过程,欧姆表指针始终指向无穷大。



(a) 通过短路棒放电　(b) 与欧姆表连接瞬间指针就变为0　(c) 电容通过欧姆表的电池充电时指针将开始缓慢移动　(d) 当电容充电完毕时，指针指向无穷大

图 13.55　用欧姆表测试电容。测试证明该电容是好的

13.8.2　用 *LCR* 表测电容值和其他参数

图 13.56 所示的 *LCR* 表可用来测试电容的值。大多数电容的电容值会随时间变化，有的电容变化很大。例如，陶瓷电容的值在第一年内往往会变化 10% 到 15%。电解电容的电容值变化是由于电解质的干燥引起的。其他情况包括电容的值标注错误，或者把错误值的电容连到电路中。电容值发生变化产生的影响比不正确的电容产生的影响要低 25%，而电容值测试方法可以很快消除这一点，就像发现并排除电路故障一样。



图 13.56　典型的 *LCR* 表(图片的使用得到了 B&K Precision Corp. 的授权)

典型的 *LCR* 表通常可以测试 200 pF 到 20 mF 的电容值。测试方法是把 *LCR* 表与电容相连，然后设置开关，最后读取显示的值。一些 *LCR* 表还可以用来测试电容的电流泄漏。为了测试泄漏，要给电容加足够大的电压来模拟工作环境。这是通过测试仪器自动完成的。超过 40% 的电容有超标准的泄漏电流，而且电解电容极易受到这个问题的影响。

介电吸收的问题主要在电解电容中发生，当电解电容不完全放电或仍具有残留电荷的时候会发生介电吸收。大约有 25% 的电容会有这类问题。

有时在电容中发现的另一个问题是过大的等效串联电阻。这个问题可能是由于与平板接触不良、电阻导线或平板电阻等有缺陷的连接引起的，并且只在交流电路条件下出现。这是最特殊的电容缺陷，占所有电容缺陷的 10% 以下。

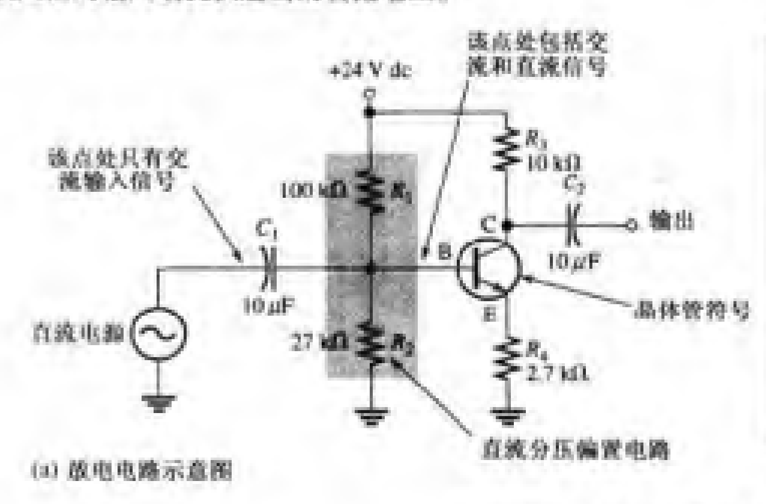
13.8 节练习

1. 电容从电路中拆除后怎样放电？
2. 描述如果检测的电容是好的，欧姆表的指针将会怎样。
3. 列出 4 种常见的电容缺陷。

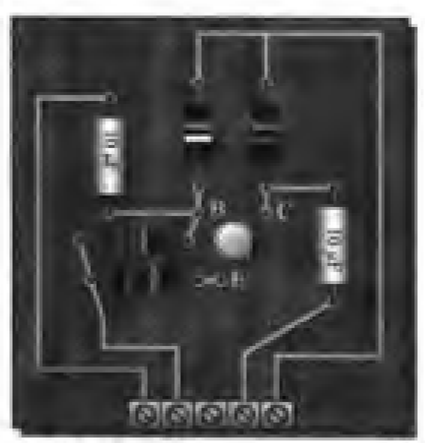
技术实践

电容用于一定类型的放大器，主要作用是耦合放大交流信号的同时阻止直流电压。电容还有许多其他的应用，但在技术实践中，我们主要关注放大电路中的耦合电容。这个课题在 13.7 节中已经讨论过了。了解放大电路对于完成作业并不是必须的。

所有放大电路都包含一定的直流电压，主要为晶体管放大交流信号创建适当的条件。这些直流电压称为偏压。如图 13.57(a)所示，放大器中的直流偏压电路一般是由 R_1 和 R_2 组成的电压分压器。这个分压器在放大器的输入端提供适当的直流电压。



(a) 放电电路示意图



(b) 放电器电路板

图 13.57　电容耦合放大器

一个交流信号电压作用于放大器时，输入与电容 C_1 耦合，防止交流电压源的内部阻抗改变直流偏压。如果没有这个电容，源内部阻抗会表现出与 R_2 并联并且改变直流电压的值。

选择耦合电容要求在交流信号频率下的电容阻抗(X_C)比偏压电阻小得多。这样耦合电容可以高效率地将交流信号从源耦合到放大器输入端。耦合电容从源方面看输入只有交流，而在放大器方面看是交流加直流(由于电压分压器信号电压叠加在直流偏压装置)，如图 13.57(a)所示。电容 C_2 是输出耦合电容，耦合放大的交流信号到能连接到输出的下一个放大级。

用示波器检测三个放大器电路板，如图 13.57(b)所示，由信号源加入适当的输入电压。如果放大器工作不正常，找出电路的问题。在所有的测试中，假设直流偏置电路放大器对电路没有影响。

印刷电路板和原理图

- 检测图 13.57(b)所示的印刷电路板，确定它与图 13.57(a)中的放大器原理图相一致。

测试电路板 1

示波器的探针把信道 1 与图 13.58 所示的电路板相连。来自正弦电压源的输入信号与电路板相连，并设置其频率为 5 kHz，振幅为 1 V rms。

- 判断示波器显示的电压和频率是否正确。如果示波器测量结果不正确，详细描述电路中最有可能出现的问题。

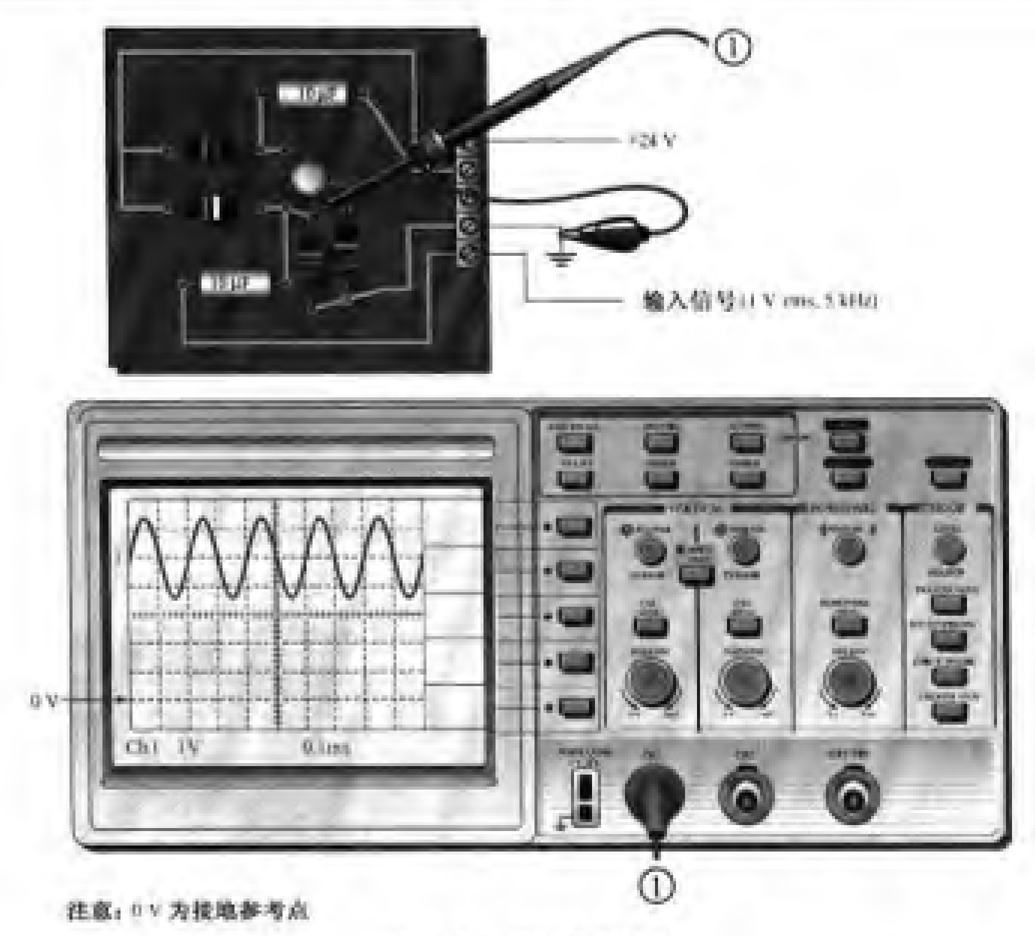


图 13.58 测试电路板 1

测试电路板 2

与图 13.58 所示的电路板 1 一样，示波器的探针把信道 1 与电路板 2 相连。来自正弦信号源的输入信号与电路板 1 的相同。

- 判断图 13.59 中示波器显示的结果是否正确。如果示波器的测量结果不正确，详细描述电路中最有可能出现的错误。

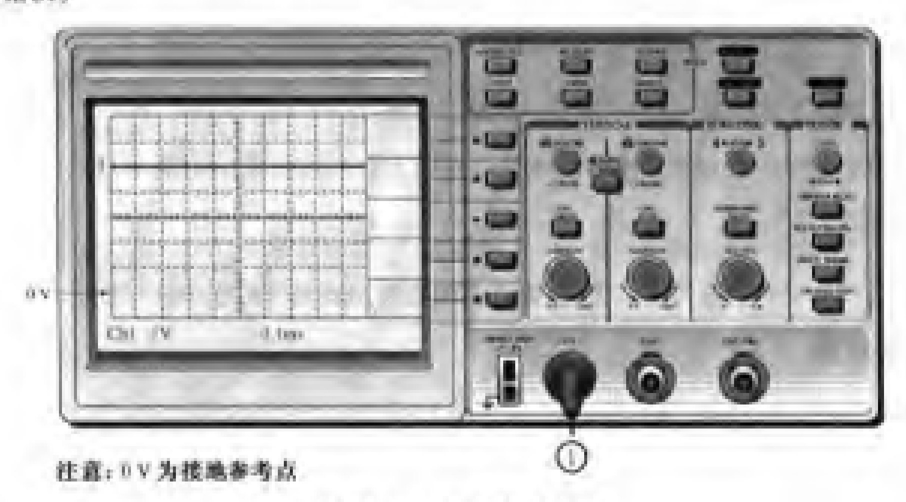


图 13.59 测试电路板 2

测试电路板 3

示波器的探头从信道 1 连接到线路板 3，如图 13.58 所示。正弦电压源的输入信号和原来的一样。

- 确定图 13.60 中示波器所显示的波形是否正确。如果不正确，说明电路中可能出现的故障。

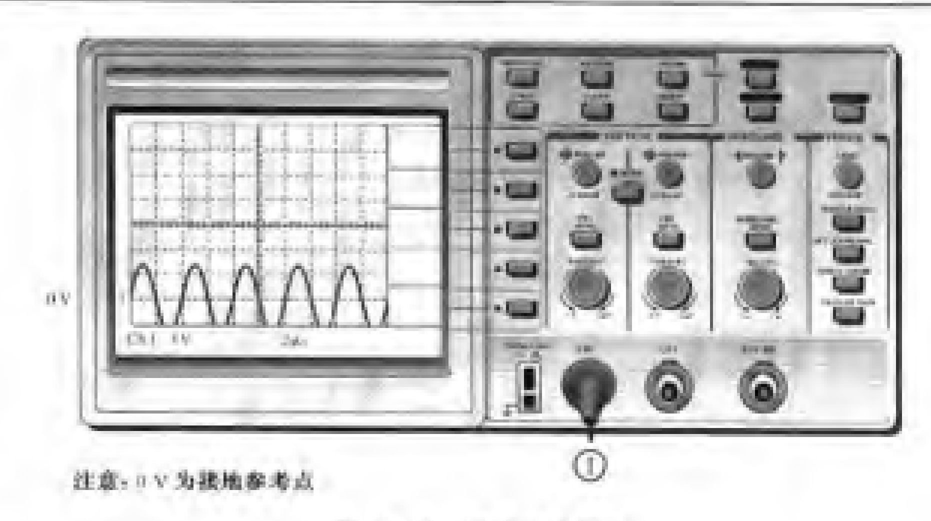


图 13.60　测试电路板 3

技术实践练习

1. 解释为什么放大器连接在交流电源上时输入端需要连接耦合电容。
2. 图 13.57 中的电容 C_3 为一输出耦合电容。当一交流输入信号加在放大器上时，通常要在电路中标有 C 处的点测量电路的输出端应有哪些值？

小结

- 把两块平行的导体极板用介质材料隔开就构成一个电容器。
- 电场中电容的极板间存储能量。
- 一法拉就是两块极板间加一伏电压时带电量是一库仑的电容。
- 电容和极板面积成正比，和极板间的距离成反比。
- 电介质常量是介质形成电场能力强弱的反映。
- 电介质的电压承受力是决定电容击穿电压的一个因素。
- 电容阻止恒定的直流电流。
- *RC* 回路的时间常量是电容乘电阻。
- *RC* 电路中，充电或放电的电容在一个时间常数内电压和电流改变 63%。
- 电容充分充电和放电需要 5 倍的时间常数。这叫做暂态时间。
- 充电和放电遵循指函数曲线。
- 串联电容比所有电容中的最小值小。
- 并联电容相加。
- 电容的电流比电压超前 90°。
- 电容的容抗 X_C 与频率和电容成反比。
- 电容有功功率为 0，即理想电容没有能量因为转换成热能而消失。

主要术语

容抗：电容对正弦电流的阻止，单位是欧姆。

电容：两块导体板中间充满介质的电子元件，电容是其属性。

库仑定律：为物理定律，说明两个带电体之间的引力与其带电量成正比，与它们之间的距离成反比。

电介质：电容两块极板之间的绝缘物质。

法拉(F)：电容的单位。

瞬时能量(p)：任何给定时间电容的能量。

RC 时间常数：由 R 和 C 决定的一个固定时间值，决定了串联 RC 回路的时域响应。等于电阻和电容的积。

无功功率(P_r)：电容存储和释放能量的速率，单位是 VAR。

波动电压(P_{rure})：由于电容充电和放电引起的电压小波动。

有功功率：电路中损耗的能量，通常是热能。

VAR：无功功率的单位。

公式

编号	公式	说明
13.1	$C = \dfrac{Q}{V}$	电量和电压表示电容
13.2	$Q = CV$	电容和电压表示电量
13.3	$V = \dfrac{Q}{C}$	电量和电容表示电压
13.4	$F = \dfrac{kQ_1Q_2}{d^2}$	库仑定律(两个带电质点之间的引力)
13.5	$W = \dfrac{1}{2}CV^2$	电容储能
13.6	$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$	介电常数(相对)
13.7	$C = \dfrac{A\varepsilon_r(8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{F/m})}{d}$	电容的物理学公式
13.8	$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots = Q_n$	串联电容的电量(通用)
13.9	$\dfrac{1}{C_T} = \dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \dfrac{1}{C_3} + \cdots + \dfrac{1}{C_n}$	串联电容的倒数(通用)
13.10	$C_T = \dfrac{1}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \dfrac{1}{C_3} + \cdots + \dfrac{1}{C_n}}$	串联电容(通用)
13.11	$C_T = \dfrac{C_1C_2}{C_1 + C_2}$	两个电容的串联
13.12	$C_T = \dfrac{C}{n}$	等值电容的串联
13.13	$V_x = \left(\dfrac{C_T}{C_x}\right)V_T$	串联电容的分压
13.14	$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots + Q_n$	并联电容的电量(通用)
13.15	$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n$	并联电容(通用)
13.16	$C_T = nC$	等值电容并联的总电容
13.17	$\tau = RC$	时间常数
13.18	$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau}$	指数形式的电压(通用)
13.19	$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-t/\tau}$	指数形式的电流(通用)
13.20	$v = V_F(1 - e^{-t/RC})$	从 0 开始增加的指数电压
13.21	$v = V_ie^{-t/RC}$	降为 0 的指数电压
13.22	$t = -RC\ln\left(\dfrac{v}{V_i}\right)$	呈指数级减少的时间($V_F = 0$)
13.23	$t = -RC\ln\left(1 - \dfrac{v}{V_F}\right)$	呈指数级增加的时间($V_i = 0$)

13.24 $i = \frac{dq}{dt}$　　用电量计算瞬时电流

13.25 $i = C\left(\frac{dv}{dt}\right)$　　用电压计算瞬时电容电流

13.26 $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$　　容抗

13.27 $P_r = V_{rms}I_{rms}$　　电容的无功功率

13.28 $P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_C}$　　电容的无功功率

13.29 $P_r = I_{rms}^2 X_C$　　电容的无功功率

自测题

1. 下列关于电容叙述正确的是：
   (a) 极板是导体。
   (b) 极板间的介质是绝缘体。
   (c) 电容中有恒定的直流电流。
   (d) 电容不和电源相连时，存储的电量不确定。
   (e) 以上都不对
   (f) 以上答案都对
   (g) 只有(a)和(b)是对的
2. 下列叙述哪个正确？
   (a) 带电量的电容介质中有电流。
   (b) 电容和交流电源相连时，将会从电源充电。
   (c) 理想的电容从电源上断开时放电。
3. 0.01 mF 的电容大于：
   (a) 0.000 01 F　(b) 100 000 pF　(c) 1000 pF　(d) 以上所有答案
4. 1000 pF 的电容小于：
   (a) 0.01 μF　(b) 0.001 μF　(c) 0.000 000 01 F　(d) (a)和(c)都是
5. 电容两端的电压增大，储能将：
   (a) 增大　(b)减少　(c)不变　(d) 波动
6. 电容两端的电压变成原来的两倍，储能将：
   (a) 保持不变　(b) 减半　(c) 增加 4 倍　(d) 增加 2 倍
7. 下面哪种方法可以增加电容电压？
   (a) 增加极板间的距离　(b)减小极板间的距离
   (c) 增大极板的面积　(d) (b)和(c)都是
8. 下面哪种方法可以增加电容？
   (a) 减小极板的面积　(b) 增加极板间的距离
   (c) 减小极板间的距离　(d) 增加极板的面积
   (e) (a)和(b)都正确　(f) (c)和(d)都正确
9. 如果 1 μF，2.2 μF，0.047 μF 的电容串联，总的电容小于：
   (a) 1 μF　(b) 2.2 μF　(c) 0.047 μF　(d) 0.001 μF
10. 4 个 0.022 μF 的电容并联，总电容是：
    (a) 0.022 μF　(b) 0.088 μF　(c) 0.011 μF　(d) 0.044 μF

11. 一个不带电的电容和一个电阻、一个开关、一个 12 V 的电源串联。开关闭合的瞬间,电容上的电压是:
(a) 12 V (b) 6 V (c) 24 V (d) 0 V
12. 第 11 题中电容充电完成后两端的电压是:
(a) 12 V (b) 6 V (c) 24 V (d) −6 V
13. 第 11 题中电容完全充电所用的时间大约是:
(a) RC (b) $5RC$ (c) $12RC$ (d) 无法计算
14. 电容上加正弦电压时,若电压的频率增加,电流将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变 (d) 消失
15. 电容和电阻串联接在正弦电源上。频率的大小使容抗和电阻相等,因此,每个元件上的电压相同。如果频率减小,则:
(a) $V_R > V_C$ (b) $V_C > V_R$ (c) $V_R = V_C$
16. 把欧姆表接在一个不带电的电容上,指针稳定在 50 kΩ 处,该电容将会:
(a) 完好 (b) 带电 (c) 太大 (d) 漏电

故障检修测试

参见图 13.68

1. 如果开关切换到位置 2,C_1 上的电量将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变
2. 如果 C_5 短路,C_1 上的电量将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变
3. 如果开关切换到位置 2,C_2 开路,C_5 上的电量将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变

参见图 13.69

4. 假设开关闭合,C 能够完全充电。开关打开时,C 上的电压将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变
5. 如果开关闭合的时候 C 开路,则 C 上的电压将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变

参见图 13.72

6. 如果闭合开关让电容充电,然后再将开关打开,则电容上的电压将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变
7. 如果 R_2 断开,电容完全充电所用的时间将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变
8. 如果 R_4 断开,电容充电能达到的最大电压将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变
9. 如果 V_S 减小,电容完全充电所用的时间将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变

参见图 13.75(b)

10. 如果交流电源的频率增加,总电流将:
(a) 增加 (b) 减少 (c)不变
11. 如果 C_1 断开,C_2 中的电流将:
(a) 增加 (b) 减少 (c) 不变

12. 如果 C_2 的值改为 1 μF，通过的电流将：
(a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

习题(标有*的习题难度较大，奇数号习题的答案见本书的最后)

13.1节　基本电容

1. (a) 计算 $Q = 50\ \mu C$，$V = 10\ V$ 时的电容。
(b) 计算 $C = 0.001\ \mu F$，$V = 1\ kV$ 时的电量。
(c) 计算 $Q = 2\ mC$，$C = 200\ \mu F$ 时的电压。
2. 将下列值由 μF 换算成 pF。
(a) 0.1 μF　(b) 0.0025 μF　(c) 4.7 μF
3. 将下列值由 pF 换算成 μF。
(a) 1000 pF　(b) 3500 pF　(c) 250 pF
4. 将下列值由 F 转换成 mF。
(a) 0.000 000 1 F　(b) 0.0022 F　(c) 0.000 000 001 5 F
5. 计算两个电子距离为 0.001 m 时的引力。
6. 电容两端的电压是 100 V，存储的能量为 10 mJ，电容是多少？
7. 计算下列材料的绝对介电常数 ε。参见表 13.3 中列出的 ε_r。
(a) 空气　(b) 油　(c) 玻璃　(d) 聚四氟乙烯
8. 一云母电容的极板面积是 0.04 m^2，极板间的距离 0.008 m，电容是多少？
9. 空气电容极板的面积为 0.1 m^2，极板间的距离是 0.01 m，计算电容。
10. 温度 25 ℃，电容为 1000 pF，温度系数为负的 200 ppm/℃。温度为 75 ℃时的电容是多少？
11. 一个 0.001 μF 电容的温度系数为正的 500 ppm/℃。温度增加 25 ℃时电容的改变量是多少？

13.2节　电容种类

12. 云母电容叠加成堆时，极板的面积如何增加？
13. 云母和陶瓷的介电常数哪一个大？
14. 标出图 13.61 中如何在 R_2 两端 A 点和 B 点之间接电解电容。
15. 说出两种类型的电解电容。电解电容和其他电容有什么不同？
16. 识别图 13.62 中电容切面所示的各个部分。

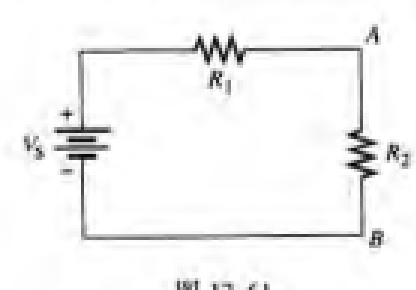


图 13.61

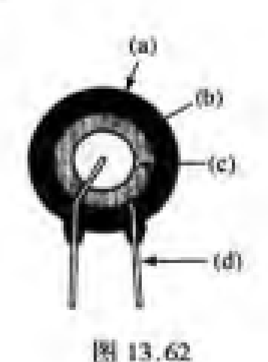
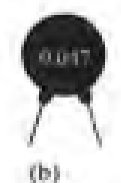


图 13.62

17. 计算图 13.63 中元件的电容。



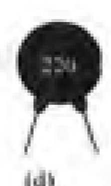
(a)



(b)



(c)



(d)

图 13.63

13.3 节 串联电容

18. 5 个 1000 pF 的电容串联，总电容是多少？
19. 计算图 13.64 中各个电路的总电容。

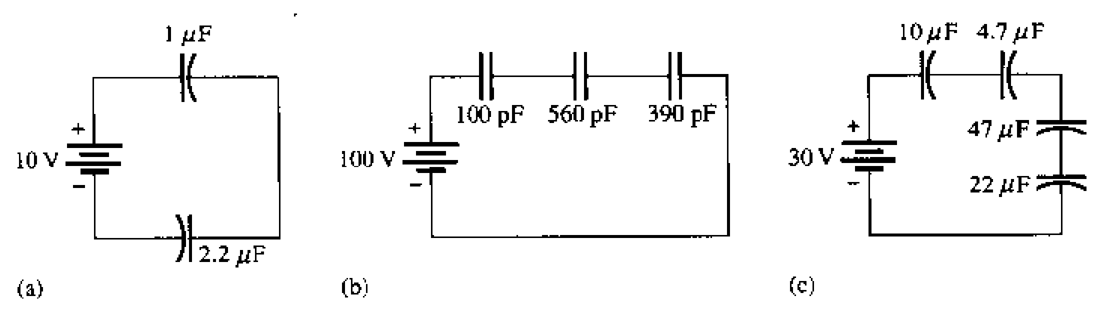


图 13.64

20. 计算图 13.64 中各个电容上的电压。
21. 两个串联电容(一个 1 μF,另一个大小未知)从 12 V 的电源充电。1 μF 的电容电压为 8 V 时，另一个电容的电压为 4 V。未知电容器的电容是多少？
22. 图 13.65 中串联电容的总电量是 10 μC,计算每个电容上的电压。

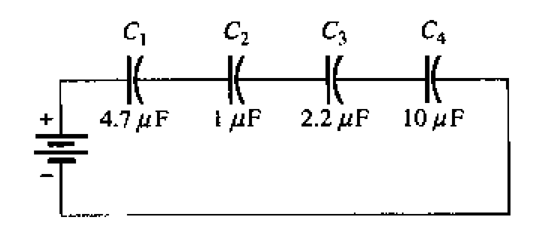


图 13.65

13.4 节 并联电容

23. 计算图 13.66 中各个电路的总电容。

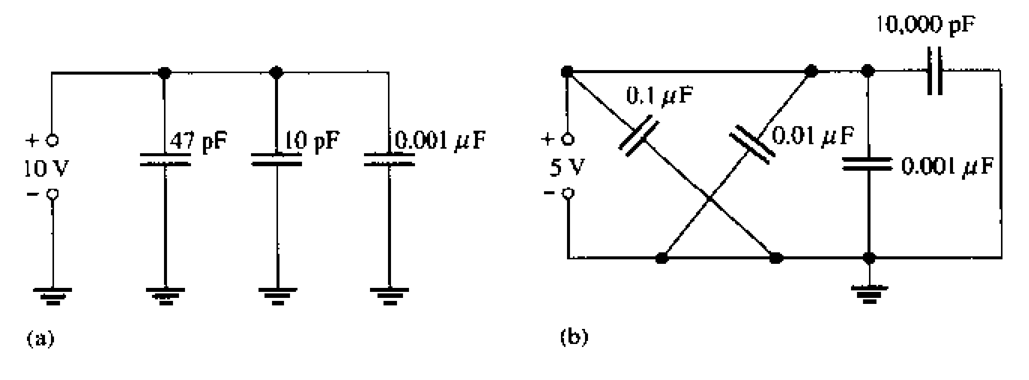


图 13.66

24. 计算图 13.66 中各个电容的电量。
25. 计算图 13.67 中各个电路的总电容。
26. 图 13.67 中各个电路 A 点和 B 两点之间的电压是多少？

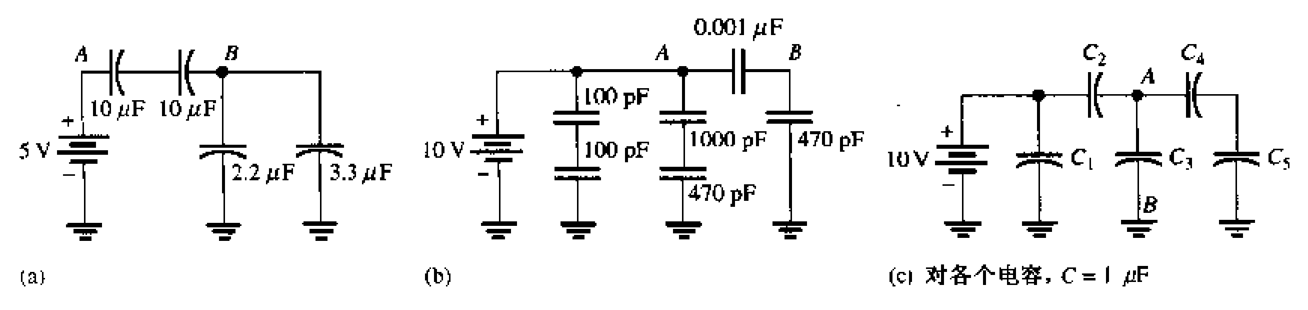


图 13.67

*27. 图13.68中开关从位置1切换到位置2时，C_5 和 C_6 上的电压变化了多少？

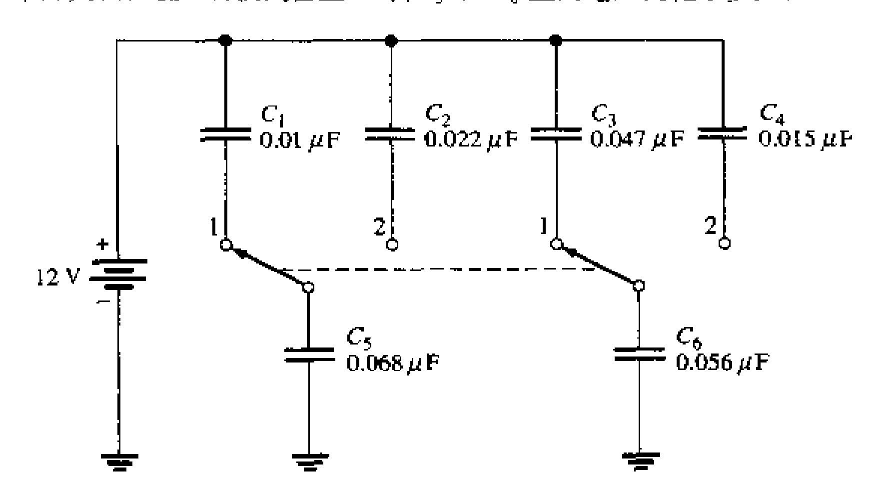


图13.68

13.5节　直流电路中的电容

28. 计算下列 RC 串联电路的时间常数。
    (a) $R = 100\ \Omega, C = 1\ \mu F$　　(b) $R = 10\ M\Omega, C = 47\ pF$
    (c) $R = 4.7\ k\Omega, C = 0.0047\ \mu F$　　(d) $R = 1.5\ M\Omega, C = 0.01\ \mu F$
29. 计算下列电容完全充电所用的时间。
    (a) $R = 56\ \Omega, C = 47\ \mu F$　　(b) $R = 3300\ \Omega, C = 0.015\ \mu F$
    (c) $R = 22\ k\Omega, C = 100\ pF$　　(d) $R = 5.6\ M\Omega, C = 10\ pF$
30. 图13.69所示的电路中，电容初始时不带电，计算开关闭合后下列时刻电容的电压。
    (a) 10 μs　(b) 20 μs　(c) 30 μs　(d) 40 μs　(e) 50 μs
31. 图13.70中，电容充电到25 V。开关闭合后，下列时刻电容的电压是多少？
    (a) 1.5 ms　(b) 4.5 ms　(c) 6 ms　(d) 7.5 ms

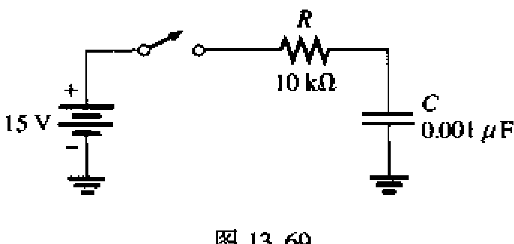


图13.69

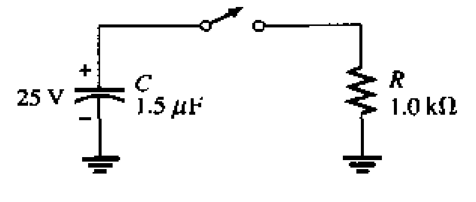


图13.70

32. 替换采用下列时刻重新完成第30题。
    (a) 2 μs　(b) 5 μs　(c) 15 μs
33. 替换采用下列时刻重新完成第31题。
    (a) 0.5 ms　(b) 1 ms　(c) 2 ms

*34. 推导呈指数级增加的电压曲线上计算时间的公式。用推导出的公式计算图13.71中开关闭合后电压达到6 V所用的时间。

35. 图13.69中电容 C 充电到8 V所用的时间是多少？
36. 图13.70中电容 C 放电到3 V所用的时间是多少？
37. 计算图13.72中电路的时间常数。

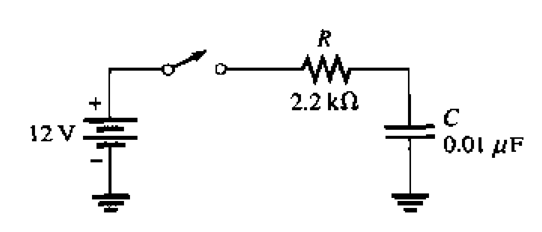


图13.71

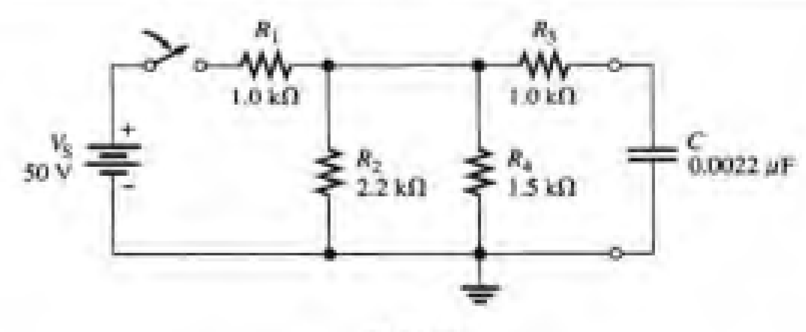


图 13.72

*38. 图 13.73 中，电容初始时不带电。开关闭合后 $t = 10\ \mu s$ 时，电容的电压是 7.2 V。计算电阻 R 的值。

*39. (a) 图 13.74 中开关在位置 1 时电容没有充电。若开关在位置 1 停留 10 ms，然后再换到位置 2，并且开关的位置不再改变，画出电容电压的波形。

(b) 如果开关 5 ms 后又从位置 2 回到了位置 1，然后停留在位置 1，波形又是什么样？

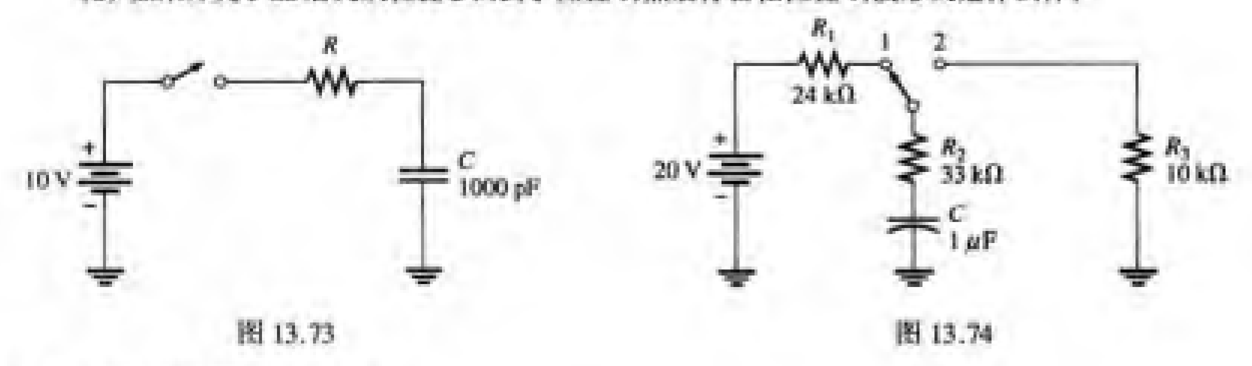


图 13.73　　图 13.74

13.6 节　交流电路中的电容

40. 图 13.75 中各个电路的总容抗是多少？

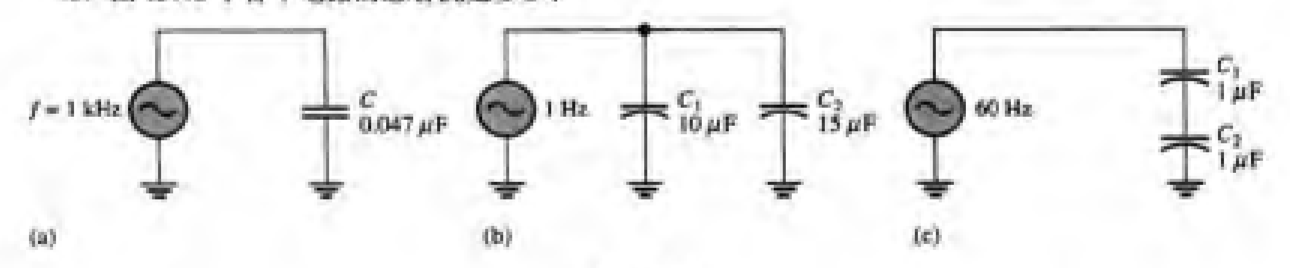


图 13.75

41. 图 13.67 中，用幅值为 10 V，频率为 2 Hz 的正弦交流电替换每个直流电压源，计算总容抗。

42. 图 13.75 中，要产生 100 Ω 的容抗 X_C，频率应该是多少？1 kΩ 的容抗呢？

43. 幅值为 20 V 的正弦交流电接某一电容时产生幅值 100 mA 的正弦电流，计算容抗。

44. 10 kHz 电压加在 0.0047 μF 的电容上产生 1 mA 的电流，电压是多少？

45. 计算习题 44 中的有功功率和无功功率。

*46. 计算图 13.76 中各个电容上的交流电压和各电路分支的电流。电流和电压的相位差是多少？

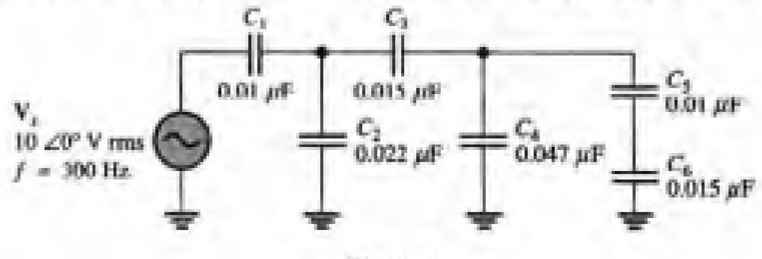


图 13.76

47. 计算图 13.77 中 C_1 的值。

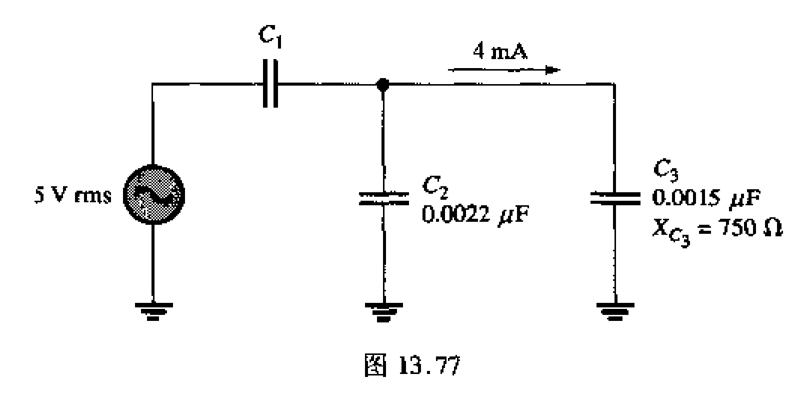


图 13.77

13.7 节 电容应用

48. 图 13.52 中，如果在滤波器已有的电容旁边再并联一个电容，对波形有什么影响？

49. 理想情况下，放大电路中某一点要消除 10 kHz 的交流电压，旁路电容的容抗应该是多少？

13.8 节 电容测试

50. 假设用欧姆表测量一个电容，接到电容两端时指针在左端位置不动，可能是什么问题？

51. 用欧姆表检测电容时，指针指向刻度盘的右端不动，可能是什么问题？

*52. 如果图 13.76 中 C_4 断路，计算其他电容上的电压。

EWB/Multisim 故障检修

这些题目需要用到本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

53. 打开文件 P13.53，测量电容上的电压。

54. 打开文件 P13.54，测量电容上的电压。

55. 打开文件 P13.55，测量电流。将频率减少到一半时再测一次电流，解释所观察到的现象。

56. 打开文件 P13.56，看是否有电容断路。

57. 打开文件 P13.57，看是否有电容短路。

答案

13.1 节 基本电容

1. 电容是存储电荷的能力。
2. (a) 1 F = 1 000 000 μF　(b) 1 F = 1×10^{12} pF　(c) 1 μF = 1 000 000 pF
3. 0.0015 μF = 1500 pF; 0.0015 μF = 0.000 000 001 5 F
4. $W = 1/2CV^2 = 1.125\ \mu J$
5. (a) C 增大　(b) C 减小
6. (1000 V/mil)(10 mil) = 10 kV
7. $C = 0.425\ \mu F$
8. $C = 2.01\ \mu F$

13.2 节 电容种类

1. 电容可以根据电解质分类。
2. 固定电容元件的电容不可以改变，而可变电容元件的电容可以改变。
3. 电解电容有极性。
4. 连接有极性的电容时，分清电压方向很重要。应该将电容的正极和电路的正极相连。

13.3 节 串联电容

1. 串连的总电容小于最小的电容。
2. $C_T = 61.2\ pF$
3. $C_T = 0.006\ \mu F$
4. $C_T = 20\ pF$
5. $V_{C1} = 75.2\ V$

13.4 节 并联电容

1. 并联电路中各个电容的值相加。
2. 将 5 个 0.01 μF 的电容并联。
3. $C_T = 167\ pF$

13.5 节 直流电路中的电容

1. $\tau = RC = 1.2\ \mu s$
2. $5\tau = 6\ \mu s$; $V_C = 4.97\ V$
3. $v_{2ms} = 8.65\ V$; $v_{3\,ms} = 9.50\ V$; $v_{4\,ms} = 9.82\ V$; $v_{5\,ms} = 9.93\ V$
4. $v_C = 38.6\ V$
5. $v_C = 4.93\ V$
6. $t = 9.43\ \mu s$

13.6 节 交流电路中的电容

1. 电容中电流比电压超前 90°。
2. $X_C = 1/2\pi fC = 637\ k\Omega$
3. $f = 1/2\pi X_C C = 796\ Hz$
4. $\mathbf{I}_{rms} = 629\angle 90°\ mA$
5. $P_{true} = 0\ W$
6. $P_r = 0.453\ VAR$

13.7 节 电容应用

1. 电容充电到达电压峰值时,下一个峰值到达之前几乎不损失电量,因此整流电压平滑。
2. 耦合电容通交流,隔直流。
3. 一定频率下要忽略电抗,电容必须足够大。
4. 分离的电容减少电场能转换成势能。
5. X_C 和频率成正比,所以滤波器可以通交流。
6. 电容

13.8 节 电容测试

1. 电容极板短路,电容放电。
2. 如果电容完好,开始时指针指向 0,然后缓慢移动到刻度盘电阻最大处。
3. 短路、断路、泄漏和电介质击穿是电容常见的故障。

技术实践

1. 电容阻碍干扰,只允许输入信号通过。
2. C 点有直流电压和交流电压,输出端只有交流电压。

实例相关练习

13.1 100 kV
13.2 0.047 μF
13.3 100×10^{6} pF
13.4 6638 pF
13.5 1.54 μF
13.6 278 pF
13.7 0.011 μF
13.8 2.83 V
13.9 650 pF
13.10 0.09 μF
13.11 891 μs
13.12 8.36 V
13.13 8.13 V
13.14 ≈0.74 ms;95 V
13.15 1.52 ms
13.16 3.39 kHz
13.17 $4.40\angle 90^\circ$ mA
13.18 0 W;1.01 mVAR

自测题

1. (g)　2. (b)　3. (c)　4. (d)　5. (a)　6. (d)　7. (a)　8. (f)
9. (c)　10. (b)　11. (d)　12. (a)　13. (b)　14. (a)　15. (b)　16. (d)

故障检修测验

1. (c)　2. (a)　3. (c)　4. (c)　5. (a)　6. (b)　7. (a)　8. (a)
9. (c)　10. (a)　11. (c)　12. (b)

第14章　电　　感

引言

前面已经介绍了三类无源电子器件中的两种:电阻和电容。现在,将探讨第三种无源电子器件——电感。

本章将介绍电感及其特性,讨论电感的基本组成和电特性,分析电感在串、并联电路中的作用。直流和交流电路中电感的工作方式是本章的重点内容,是学习电路的频率响应和时间响应的基础。另外,本章还会介绍如何检测电感的故障。

电感元件实际上是一个金属线圈,以第10章介绍的电磁感应理论为基础。

电感是金属线圈具有的阻止电流变化的性质。电感的基本特性是导体中有电流通过时,导体周围存在电磁场。具有电磁感应特性的电子器件称为电感元件、线圈或者扼流圈,这几种不同的名称指的都是同一种器件。

本章目标

- 叙述电感元件的基本组成和特性
- 讨论电感元件的各种类型
- 分析串联的电感元件
- 分析并联的电感元件
- 分析直流电路
- 分析交流电路
- 讨论电感元件的应用
- 测试电感元件

主要术语

- 电感元件
- 绕线
- 感应电压
- 电感
- 亨[利](H)
- *RL* 时间常数
- 感抗
- 品质因数(*Q*)

技术实践

在技术实践中,可以通过示波器测试电路的时间常数,计算线圈的感应系数。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料,请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

14.1　基本电感元件

本节讲述电感元件的组成和特性。

学习完本节后,读者应该能够:

- 叙述电感元件的基本组成和特性
- 解释电感元件如何储能

- 明确电感的定义和单位
- 讨论感应电压
- 说明影响电感的物理参数
- 讨论绕线的电阻和电容
- 表述法拉第定律
- 表述楞次定律

将一段导线绕成线圈,就形成了一个基本的电感元件,如图14.1所示。电感元件和线圈可互换使用。电流通过线圈产生电磁场,线圈每一线匝中的磁力线增强了相邻线匝中的磁力线,在线圈内部和周围形成了一个强大的电磁场。电磁场分为南极和北极。

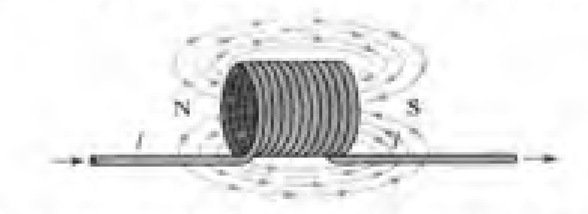


图14.1 一个线圈形成一个电感元件,当电流通过线圈时,在线圈周围形成一个三维电磁场

为了理解线圈中电磁场的形成,先看一下两个相邻线匝中电磁场的作用。把两个环靠近时,相邻线匝中的磁力线逐渐偏离成一个环路,正如图14.2(a)所示。这是因为两个线匝之间的磁感线的方向相反,当两个导线环靠近时,磁场相互抵消。叠加的电磁场见图14.2(b)。线圈中许多紧密相邻的线匝的作用叠加,使每个线匝的磁场增强。为简单起见,图中只画出了一条磁力线,实际上还有很多。

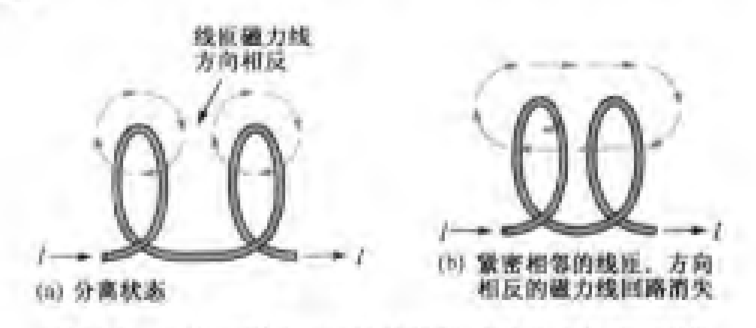


图14.2 两个相邻线匝所产生的磁场中磁力线互感情况

14.1.1 自感

电流通过电感元件时形成电磁场,电流改变时电磁场也随之改变。电流增加,电磁场增强;电流减小,电磁场减弱。因此,电流的变化引起电感元件周围电磁场的变化。反过来,电磁场的变化引起线圈内感应电压的变化,感应电压在阻碍电流的变化。这种现象叫做自感,简称电感,用L表示。

电感是线圈中电流变化时形成感应电压,感应电压反过来阻碍电流变化能力的量度。

电感的单位 亨利(H)是电感的基本单位,定义线圈中电流每秒变化1安培,形成1伏感应电压时的电感为1亨利。在实际应用中,常用的单位有毫亨(mH)和微亨(μH)。电感元件的电路符号如图14.3所示。

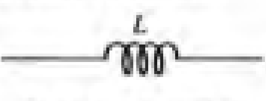


图14.3 电感符号

14.1.2 感应电压与 L 和 di/dt 有关

线圈的电感(L)和电流的变化率决定感应电压。电流的改变引起电磁场的变化,进而使线圈中产生感应电压,这个感应电压与 L 和 di/dt 成正比,用公式表示如下:

$$v_{ind} = L\left(\frac{di}{dt}\right) \tag{14.1}$$

公式表明电感越大,感应电压越大。另外,线圈中的电流变化越快(即 di/dt 越大),感应电压越大。注意式(14.1)和式(13.25),即 $i = C(dv/dt)$ 的相似之处。

例 14.1 计算电感为 1 H,电流变化率为 2 A/s 时的感应电压。

解:

$$v_{ind} = L\left(\frac{di}{dt}\right) = (1\ \text{H})(2\ \text{A/s}) = \mathbf{2\ V}$$

练习:电流的变化率为 10 A/s 时产生的感应电压为 50 V,计算电感。

14.1.3 能量存储

电感元件的能量存储在电流产生的电磁场中。存储的能量通过以下公式计算:

$$W = \frac{1}{2}LI^2 \tag{14.2}$$

正如所看到的,储能与电感和电流的平方成正比。电流的单位为安培,电感的单位为亨时,能量的单位是焦尔。

14.1.4 电感元件的物理特性

线圈的电感和下列参数相关:心体材料的磁导率、线圈的匝数、心体长度和心体的横截面积。

心体的材料 如前所述,电感元件实际上是磁性或非磁性材料心体外绕导线线圈。磁体材料有铁、镍、钢、钴或者合金。这些材料属于铁磁体,其磁导率是在真空中的百倍或者千倍以上。铁磁体的心体能为磁场的形成提供较好的条件,而且可以承受较强的磁场。非磁性材料有空气、铜、塑料和玻璃。这些材料的磁导率和在真空中相同。

如第 10 章所述,心体材料的磁导率(μ)决定磁场形成的难易程度,电感与心体材料的磁导率成正比。

物理参数 如图 14.4 所示,线圈的匝数、心体的长度、横截面积和材料是电感的决定因素。电感和心体的长度成反比,与其横截面积成正比。另外,电感与线圈匝数的平方成正比。关系式表示如下:

$$L = \frac{N^2\mu A}{l} \tag{14.3}$$

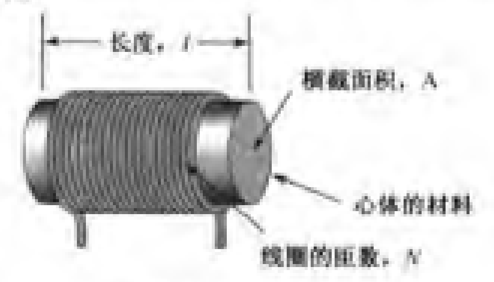


图 14.4 电感的物理参数

其中电感的单位是亨(H),N 是线圈的匝数。μ 是心体材料的磁导率,单位是亨每米(H/m)。A 是横截面积,单位是平方米(m^2)。l 是心体的长度,单位是米(m)。

例 14.2 计算图 14.5 中线圈的电感,心体的磁导率为 0.25×10^{-3} H/m。

解:首先计算长度和面积。

$$l = 1.5\ \text{cm} = 0.015\ \text{m}$$
$$A = \pi r^2 = \pi(0.25 \times 10^{-2}\ \text{m})^2 = 1.96 \times 10^{-5}\ \text{m}^2$$

线圈的电感为：

$$L=\frac{N^2\mu A}{l}=\frac{(350)^2(0.25\times10^{-3}\ \text{H/m})(1.96\times10^{-5}\ \text{m}^2)}{0.015\ \text{m}}=\mathbf{40\ mH}$$

练习：计算匝数为12，心体长0.05 m，横截面积为0.015 m^2 的线圈的电感。磁导率为 0.25×10^{-3} H/m。

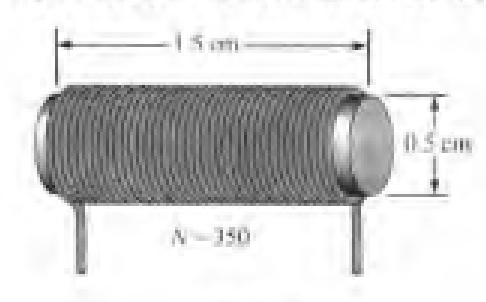
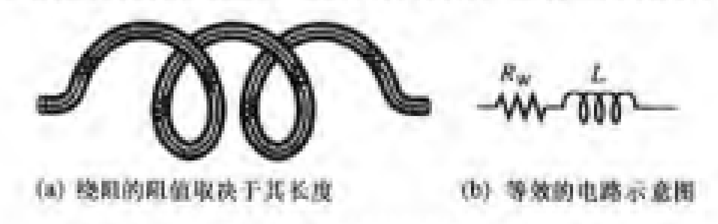


图 14.5

14.1.5 绕线电阻

某种材料（比如绝缘铜线）制成的线圈，导线每单位长度都有一定的电阻。多匝导线形成线圈时，总的电阻会较大。这种固有电阻称为直流电阻或者绕线电阻（R_W）。

虽然这种电阻分布在导线中，但可以看成和电感线圈串联，如图 14.6 所示。在许多应用中绕线电阻很小，可以忽略，线圈当做理想的电感元件使用。在有些应用中，必须考虑绕线电阻。



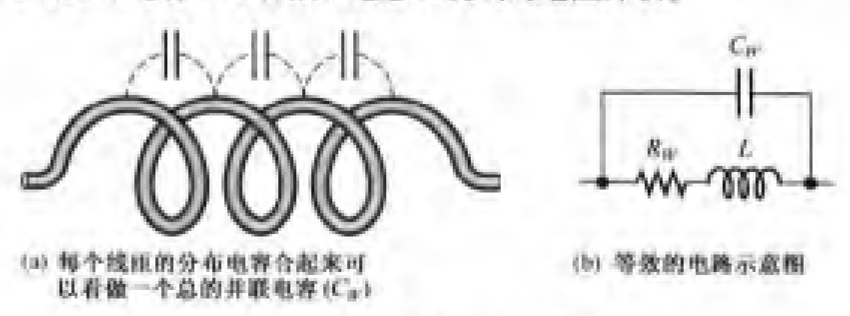
(a) 绕阻的阻值取决于其长度　　(b) 等效的电路示意图

图 14.6 线圈的绕线电阻

14.1.6 绕线电容

两个电感元件并列放置，它们之间常有电容存在。因此，当线圈中许多匝导线盘绕紧密时，必然存在一定的分布电容，称为绕线电容（C_W），这是不可避免的副作用。在许多应用中，绕线电容很小，对电路没有什么影响。但是在有些情况下，尤其是高频率的电路中，绕线电容非常重要。

有绕线电容（C_W）和绕线电阻（R_W）电感元件的等效电路如图 14.7 所示，等效电容并联连接。电路中线圈总的分布电容可以看做和电感和绕线的电阻并联。



(a) 每个线匝的分布电容合起来可以看做一个总的并联电容（C_W）　　(b) 等效的电路示意图

图 14.7 线圈的绕线电容

14.1.7 法拉第定律

第 10 章介绍了法拉第定律，因为是电感元件学习的重点，在此再复习一遍。法拉第 1831 年发现了法拉第电磁感应理论。他发现磁体通过导线线圈时，线圈产生感应电压。如果存在闭合回路，感应电压可以产生感应电流。法拉第认为：

线圈中感应电压的大小与线圈产生的电磁场变化率成正比。

这一论述可以用图 14.8 说明。图中将一根磁棒穿过线圈，从与线圈相连的电压表可以读出感应电压。磁棒移动得越快，感应电压越大。

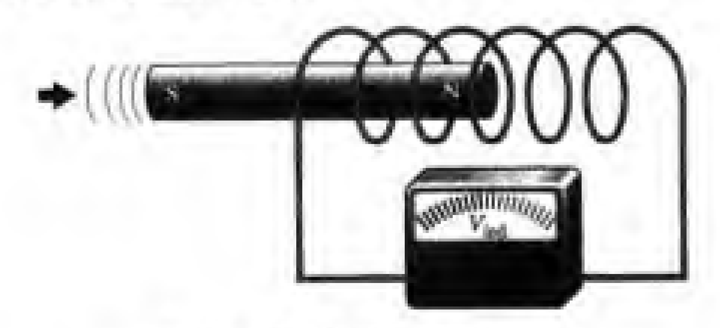


图 14.8 变化的磁场产生感应电压

由导线绕制一定匝数的线圈在变化的磁场中能形成感应电压，感应电压与线圈匝数和磁场变化率成正比。磁场变化率表示为 $d\phi/dt$，ϕ表示磁通量。速率 $d\phi/dt$ 的单位是韦伯/秒(Wb/s)。法拉第定律说明感应电压的大小等于线圈匝数乘以磁通量的变化率，公式如下：

$$v_{ind} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right) \tag{14.4}$$

例 14.3 *应用法拉第定律求线圈中的感应电压，线圈匝数为 500，放在磁场中，磁场的变化率为 5 Wb/s。*

解：

$$v_{ind} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right) = (500\ t)(5\ \text{Wb/s}) = \mathbf{2.5\ kV}$$

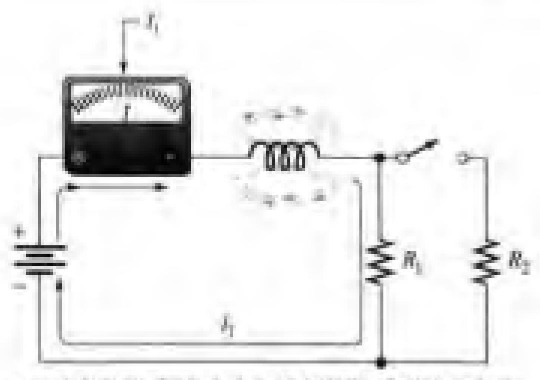
练习：*一个 1000 圈的线圈的感应电压为 500 V，磁场的变化率是多少？*

14.1.8 楞次定律

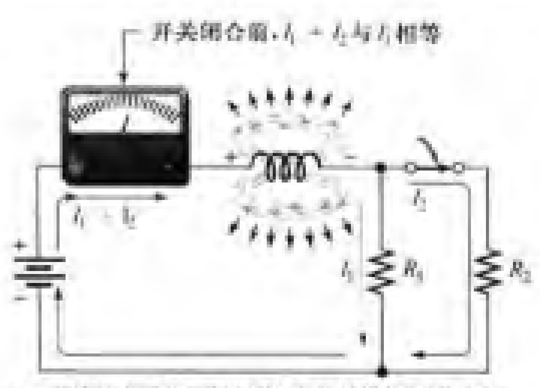
第 10 章已经介绍过了楞次定律，现在复述一遍：

线圈中的电流变化时，变化的电磁场产生感应电压，感应电压的方向正好阻碍电流的变化。

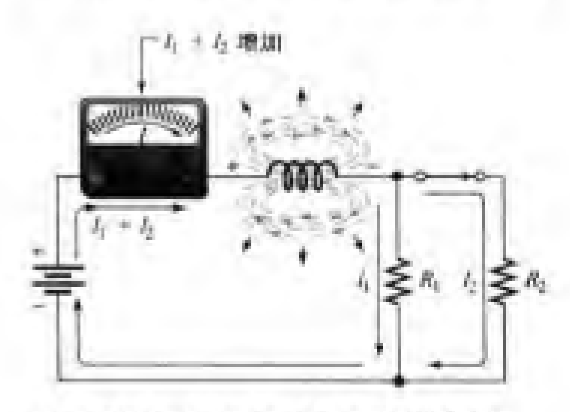
图 14.9 说明该定律。图 14.9(a)中的电流是恒定的，R_1 为限流电阻。由于磁场不变，没有感应电流。图 14.9(b)中，瞬时合上开关，使 R_2 和 R_1 并联，总电阻减少。因此电流有增大的趋势，磁场也会增强，但感应电压阻止电流瞬时增加。图 14.9(c)中，感应电压逐渐减小，使电流增加。图 14.9(d)中，电流达到一个稳定值，该值由并联的电阻决定，此时感应电压为 0。图 14.9(e)中，开关突然打开，立即有感应电压阻碍电流的减少，开关改变后电流缓慢改变。图 14.9(f)中，感应电压逐渐减小，使电流减小到只有 R_1 时的值。注意感应电压的方向阻碍电流变化。对于增大的电流，感应电压的方向和电源的方向相反；对于减小的电流，感应电压的方向和电源电压的方向相同。



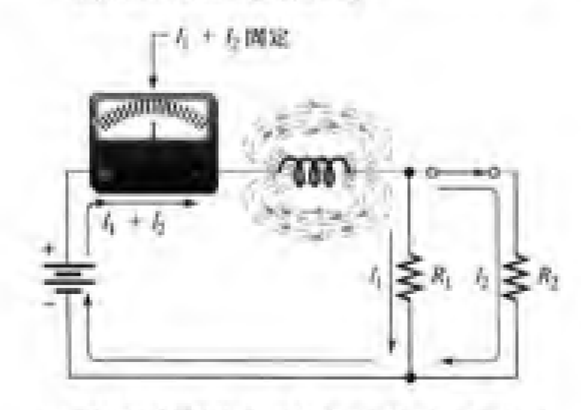
(a) 开关打开：恒定电流和恒定磁场，没有感应电压



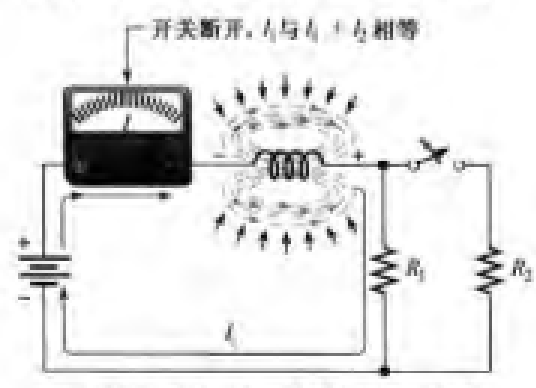
(b) 开关闭合瞬间：磁场感应电压的增加阻碍总电流的增长，该瞬间总电流不变



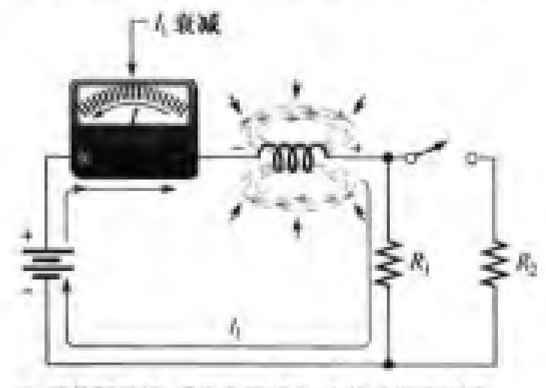
(c) 开关闭合后：感应电压减小，电流呈指数增长



(d) 开关保持闭合状态：电流和磁场达到一个稳定值



(e) 开关断开瞬间：磁场开始减弱，产生的感应电压阻碍电流的减少



(f) 开关断开后：感应电压减少，电流呈指数递减到初始值

图 14.9　电感电路中楞次定律的示例：当线圈电流变化时，变化的电磁场产生感应电压，感应电压的方向正好阻碍电流的变化

14.1 节练习

1. 列出和电感相关的物理参数。
2. 电流通过 15 mH 的电感元件，电流变化率为 500 mA/s。该电感元件中产生多大的感应电压？
3. 说出改变下列参数对 L 的影响：
   (a) N 增大
   (b) 心体长度增加
   (c) 心体横截面积减小
   (d) 去掉铁心

4. 解释为什么电感元件有绕线电阻。
5. 解释为什么电感元件有分布电容。

14.2 电感元件的类型

电感元件通常按照心体材料分类，本节将介绍电感元件的基本类型。
学完本节后，读者应该能够：

- 描述电感元件的各种类型
- 叙述固定式电感元件的基本类型
- 区分固定式和可变式电感元件

电感元件可制成各种形状和大小。大体上可以分为两类：固定式和可变式。标准电路符号如图14.10所示。

固定式和可变式电感元件都可以根据心体材料再进行分类。三种常见的类型是空心体、铁心体和铁氧体心体。各种元件都有不同的符号表示，参见图14.11。

(a) 固定式　(b) 可变式

图14.10　固定式和可变式电感元件符号

(a) 空心体　(b) 铁心体　(c) 铁氧体心体

图14.11　电感元件符号

可调(可变)式电感元件通常有一个螺旋状的调节装置，能将可滑动心体移进或移出，改变电感元件中心体的耦合长度，从而改变电感。还有其他很多电感元件，如图14.12所示。小型固定式电感元件常用绝缘材料封装起来，以便保护线圈的导线。封装的电感元件外观和电阻相似。



图14.12　典型的电感元件

14.2节练习

1. 说出两种类别的电感元件。
2. 识别图14.13中的电感元件符号。

(a)　(b)　(c)

图14.13

14.3 电感的串联

本节中将论述两个电感元件串联时，总电感增大。

学完本节后，读者应该能够：

- 分析串联的电感元件
- 计算总电感

如图 14.14 所示，电感元件串联时总电感 L_T 是各个电感的和。n 个电感元件串联的 L_T 通用公式如下：

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_n \tag{14.5}$$

注意，串联电感的计算公式与串联电阻和并联电容的计算公式相似。



图 14.14 电感元件串联

例 14.4 计算图 14.15 中每个串联电路的总电感。

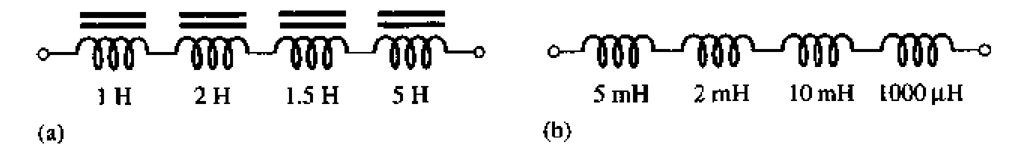


图 14.15

解：图 14.15(a)中：

$$L_T = 1\text{ H} + 2\text{ H} + 1.5\text{ H} + 5\text{ H} = \mathbf{9.5\text{ H}}$$

图 14.15(b)中：

$$L_T = 5\text{ mH} + 2\text{ mH} + 10\text{ mH} + 1\text{ mH} = \mathbf{18\text{ mH}}$$

注意：1000 μH = 1 mH

练习：10 个 50 μH 的电感元件串联时总电感是多少？

14.3 节练习

1. 说出电感元件串联公式。
2. 100 μH，500 μH 和 2 μH 的电感串联后的总电感 L_T 是多少？
3. 5 个 100 mH 的线圈串联，总电感是多少？

14.4 电感的并联

本节中将论述电感元件并联以后，总电感变小。

学完本节后，读者应该能够：

- 分析并联的电感元件
- 计算总电感

14.4.1 总电感

电感元件并联时,如图 14.16 所示,总电感小于其中最小的电感。电感元件并联电路中总电感的计算公式和电阻的并联(参见第 6 章)、电容的串联(参见第 13 章)的计算公式相似。

$$\frac{1}{L_T}=\frac{1}{L_1}+\frac{1}{L_2}+\frac{1}{L_3}+\cdots+\frac{1}{L_n} \tag{14.6}$$

这个公式说明总电感的倒数等于各个电感的倒数之和。对式(14.6)两边求倒数能得出 L_T。

$$L_T=\frac{1}{\left(\frac{1}{L_1}\right)+\left(\frac{1}{L_2}\right)+\left(\frac{1}{L_3}\right)+\cdots+\left(\frac{1}{L_n}\right)} \tag{14.7}$$

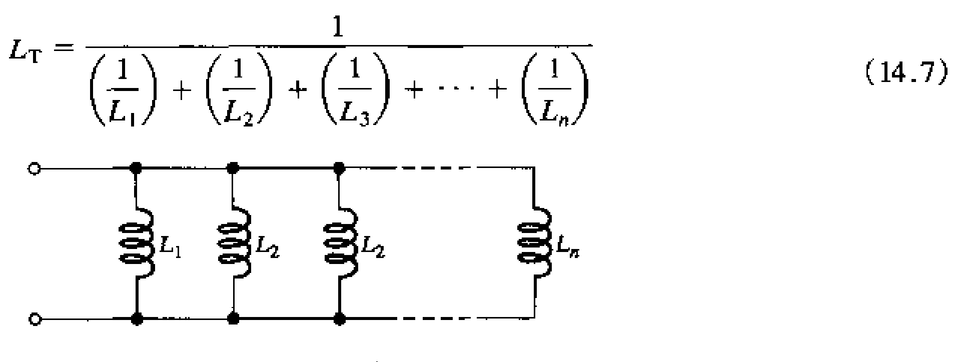


图 14.16 电感元件并联

两个电感元件的并联 只有两个电感元件并联时,由式(14.6)得出:

$$L_T=\frac{L_1L_2}{L_1+L_2} \tag{14.8}$$

等值电感的并联 这是电感元件并联的特殊情况,可以用简单的公式进行计算。计算公式仍然是由式(14.6)推出的,n 个等值的电感并联时:

$$L_T=\frac{L}{n} \tag{14.9}$$

例 14.5 计算图 14.17 中的总电感 L_T。

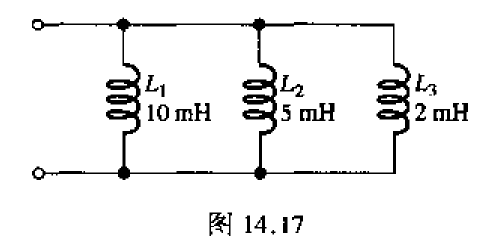


图 14.17

解:由式(14.7)得出总电感:

$$L_T=\frac{1}{\left(\frac{1}{L_1}\right)+\left(\frac{1}{L_2}\right)+\left(\frac{1}{L_3}\right)}=\frac{1}{\frac{1}{10\text{ mH}}+\frac{1}{5\text{ mH}}+\frac{1}{2\text{ mH}}}=\mathbf{1.25\text{ mH}}$$

练习:计算 50 μH,80 μH,100 μH 和 150 μH 电感元件并联时的总电感。

例 14.6 计算图 14.18 中两个电路的总电感。

解:由式(14.8)得到图 14.18(a)中两个电感元件并联时的电感。

$$L_T=\frac{L_1L_2}{L_1+L_2}=\frac{(1\text{ H})(0.5\text{ H})}{1.5\text{ H}}=\mathbf{333\text{ mH}}$$

由式(14.9)得到图 14.18(b)中等值电感元件并联时的电感。

$$L_T = \frac{L}{n} = \frac{10\ \text{mH}}{5} = 2\ \text{mH}$$

练习:计算以下情况的总电感:

(a) $L_1 = 10\ \mu\text{H}$ 和 $L_2 = 27\ \mu\text{H}$ 时的电感元件并联　(b) 5 个 100 μH 的电感并联

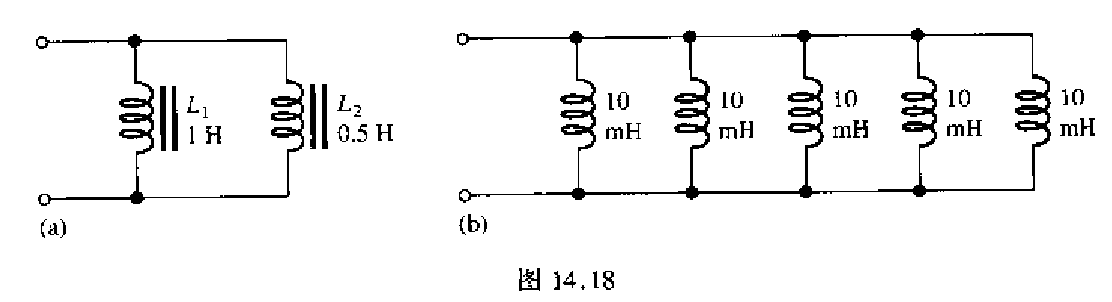


图 14.18

14.4 节练习

1. 比较并联电感的总电感和所有电感中最小电感的大小。
2. 电感元件并联时电感的计算和电阻并联时的计算公式相似。(对与错)
3. 计算每组并联电感的总电感:

   (a) 100 mH,50 mH 和 10 mH　(b) 40 μH 和 60 μH　(c) 10 个 1 H 线圈

14.5 直流电路中的电感元件

电感元件与直流电压源相连时,处于激励状态。通过电感元件的电流的增强遵循一定的规律,取决于电路的电感和电阻。本节中,用插图举例说明在开关打开和闭合时的电流变化。虽然实际应用中不是这样,但可以说明瞬时感应电路的基本原理。

学完本节后,读者应该能够:

- 分析直流开关电感电路
- 叙述激励和非激励电感
- 定义 *RL* 时间常数
- 叙述电感的充电和放电定义,计算电感充、放电时间常数
- 叙述感应电压
- 写出电感元件中的电流变化公式

电路中有恒定电流时,没有感应电压。然而,线圈上的绕线电阻有电压降。其作用是很小的,能量以电磁场形式存储在电感中。能量的大小用前面的式(14.2)计算。能量有部分转换为绕线电阻上的热能($P = I^2R_W$)。该转换参见图 14.19。

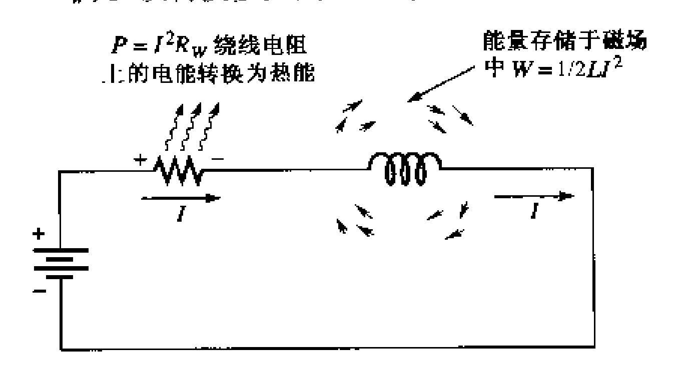


图 14.19 直流电路中电感的能量存储和转换为热能

14.5.1 *RL* 时间常数

由于电感的基本作用是产生感应电压阻碍电流的变化，所以电感元件中的电流不能瞬时突变。电流的改变需要时间，电流改变的速度由 *RL* 时间常数决定。*RL* 电路时间常数的公式如下：

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{14.10}$$

电感(L)的单位是亨，电阻(R)的单位是欧姆时，τ 的单位是秒。

例 14.7 一 *RL* 电路的电阻是 1.0 kΩ，电感是 1 mH。求时间常数。

解：

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{1\ \text{mH}}{1.0\ \text{k}\Omega} = \frac{1\times 10^{-3}\ \text{H}}{1\times 10^{3}\ \Omega} = 1\times 10^{-6}\ \text{s} = \mathbf{1\ \mu s}$$

练习：计算 $R = 2.2\ \text{k}\Omega$，$L = 500\ \mu\text{H}$ 的时间常数。

14.5.2 电感元件的激励电流

RL 串联电路中，开关闭合后在 1 个时间常数段内，电流增至最大值的 63%。电流的增加和 *RC* 电路中电容电压的增加类似，都遵循幂函数，如表 14.1 和图 14.20 所示。

表 14.1 电流形成后每个时间常数段内电流的近似百分比

时间常数段的个数	电流的近似百分比
1	63
2	86
3	95
4	98
5	99(近似看成 100%)

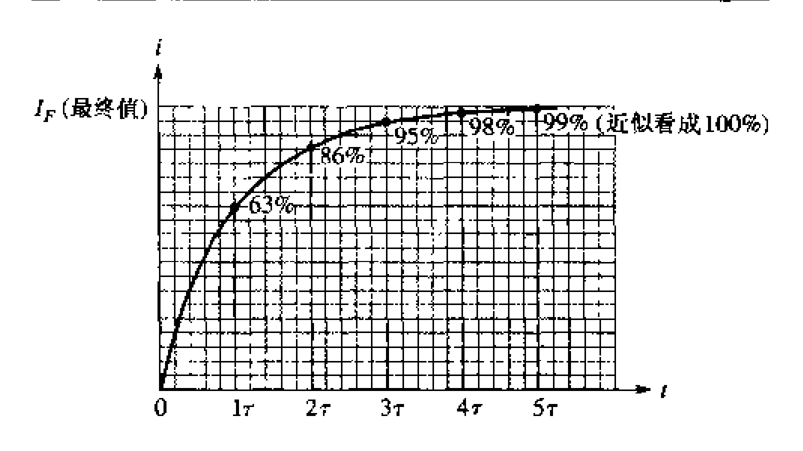
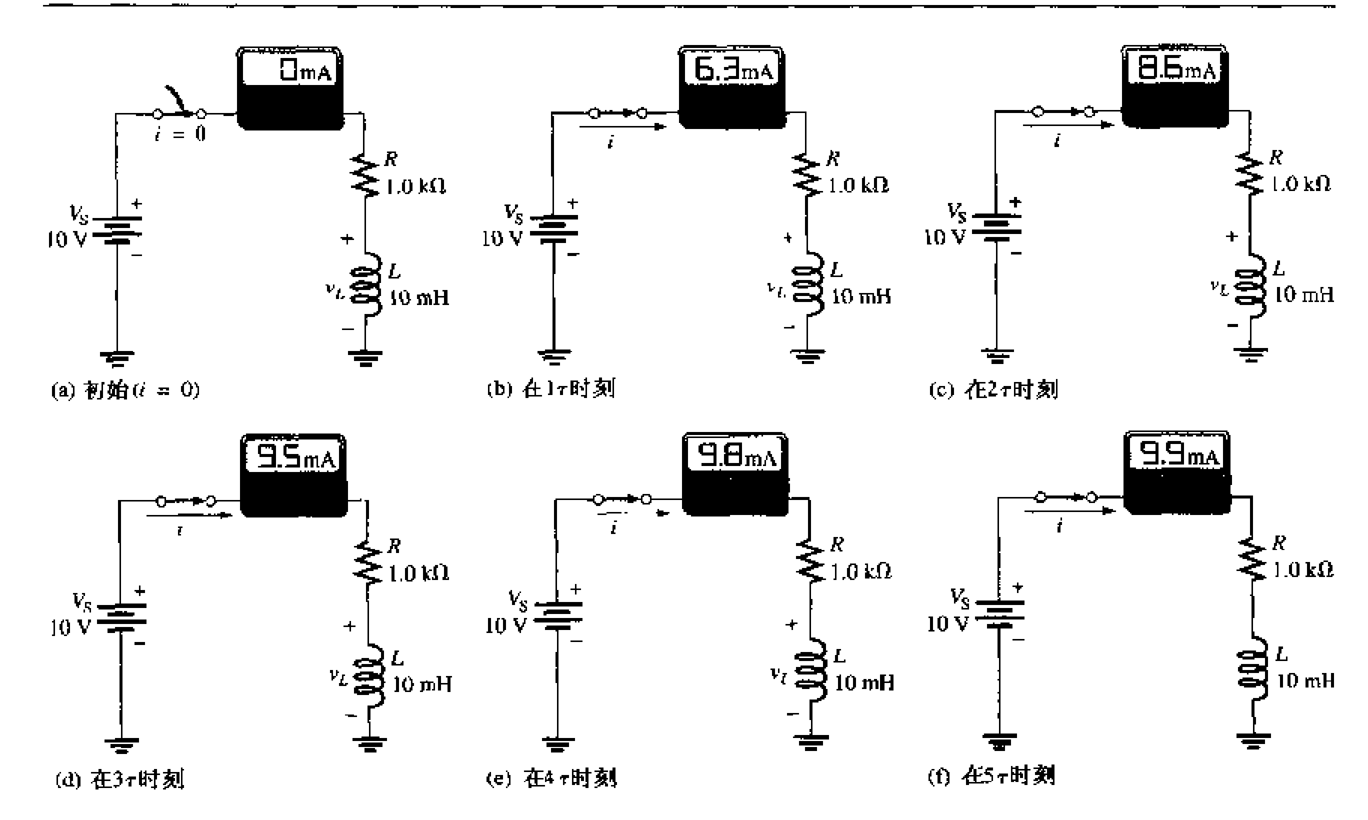


图 14.20 电感元件的激励电流

电流在 5 倍时间常数段内的变化如图 14.21 所示。在 5τ 时刻电流达到最大值，不再改变。此时，电感对恒定电流相当于短路。电流变化的最终值为：

$$I_F = \frac{V_S}{R} = \frac{10\ \text{V}}{1.0\ \text{k}\Omega} = 10\ \text{mA}$$



(a) 初始(i = 0)　(b) 在1τ时刻　(c) 在2τ时刻

(d) 在3τ时刻　(e) 在4τ时刻　(f) 在5τ时刻

图 14.21　电感激动电流的产生示例。在 1 个时间常数段内，电流增至63％，感应电压(v_L)阻碍电流的增加

例 14.8　计算图 14.22 所示电路的时间常数。然后，计算每个时间常数间隔的时刻值和对应的电流。

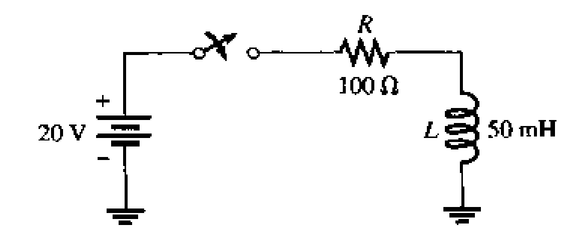


图 14.22

解：时间常数是：

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{50\ \text{mH}}{100\ \Omega} = \mathbf{500\ \mu s}$$

每个时间常数间隔时刻的电流是电流终值的某一百分比。电流终值是：

$$I_F = \frac{V_S}{R} = \frac{20\ \text{V}}{100\ \Omega} = 0.2\ \text{A} = 200\ \text{mA}$$

用表 14.1 中的百分比计算，得：

在 $1\tau = \mathbf{500\ \mu s}$ 时：　$i = 0.63(200\ \text{mA}) = \mathbf{126\ mA}$

在 $2\tau = \mathbf{1\ ms}$ 时：　$i = 0.86(200\ \text{mA}) = \mathbf{172\ mA}$

在 $3\tau = \mathbf{1.5\ ms}$ 时：　$i = 0.95(200\ \text{mA}) = \mathbf{190\ mA}$

在 $4\tau = \mathbf{2\ ms}$ 时：　$i = 0.98(200\ \text{mA}) = \mathbf{196\ mA}$

在 $5\tau = \mathbf{2.5\ ms}$ 时：　$i = 0.99(200\ \text{mA}) = 198\ \text{mA} \approx \mathbf{200\ mA}$

练习：如果 R 是 680 Ω，L 是 100 μH，重复上面的计算。

14.5.3 电感元件的放电电流

电感元件中的电流按表 14.2 和图 14.23 中的近似百分比呈指数级减少。

表 14.2 电流减少时每个时间常数段内电流值与初始电流值的近似百分比

时间常数的个数	电流的近似百分比
1	37
2	14
3	5
4	2
5	1(近似看成 0)

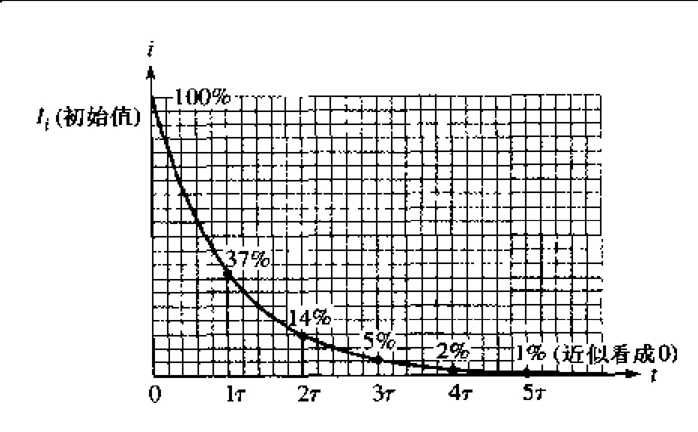
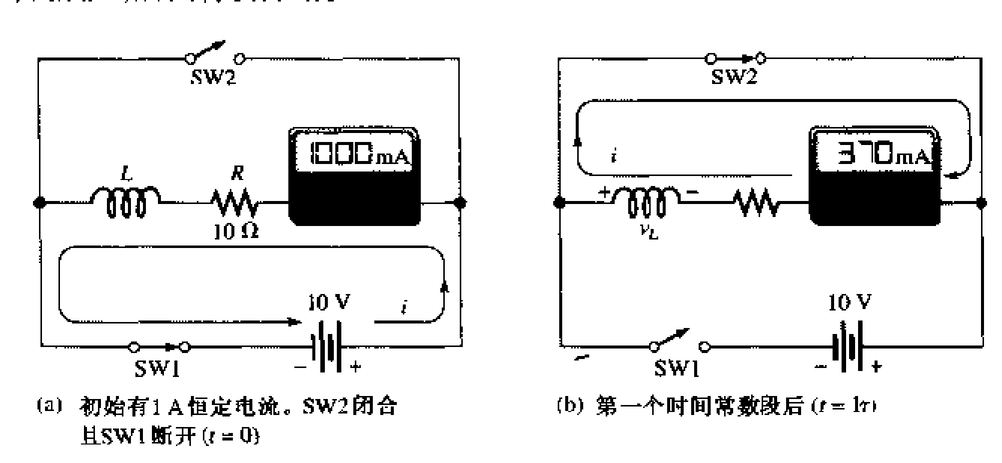


图 14.23 电感元件的放电电流

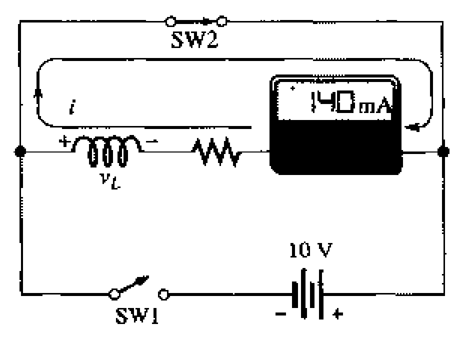
图 14.24(a)中有 1 A(1000 mA)恒定电流穿过电感元件,将开关 1 打开的同时合上开关 2,该瞬时会在电感元件内产生感应电压以维持 1 A 的电流。第一个时间常数段内,电流减少了 63%,减到 370 mA(初始值的 37%),如图 14.24(b)所示。第二个时间常数段内电流又减少了 63%,减到 140 mA(初始值的 14%),如图 14.24(c)所示。如图 14.24(b)~图 14.24(f)中所示,电流继续减少。图 14.24(f)中 5 倍时间常数段末期,电流只有初始值的 1%。这个值一般作为电流的最终值,近似为零。注意,只有 5 倍时间常数段内,线圈中有阻碍电流变化的感应电流。电压按幂函数曲线减少,后面将会介绍。



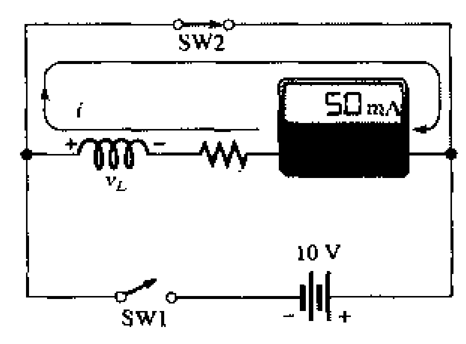
(a) 初始有1 A恒定电流。SW2闭合且SW1断开 ($t = 0$)

(b) 第一个时间常数段后 ($t = 1\tau$)

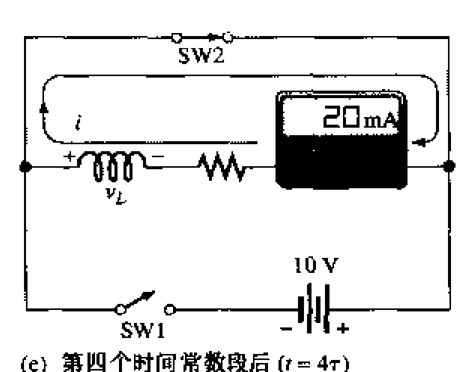
图 14.24



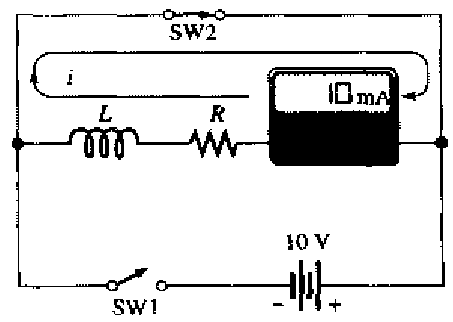
(c) 第二个时间常数段后 ($t = 2\tau$)



(d) 第三个时间常数段后 ($t = 3\tau$)



(e) 第四个时间常数段后 ($t = 4\tau$)



(f) 第五个时间常数段后 ($t = 5\tau$)。电流只有初始值的1%。一般这个值可以近似看成0值

图 14.24 (续)

例 14.9 图 14.25 中,初始时刻开关 1 打开,同时开关 2 闭合。假设开关改变之前线圈中的电流达到了稳定状态。

(a) 时间常数是多少?

(b) 开关改变时线圈中的初始电流是多少?

(c) 1τ 时线圈中的电流是多少?

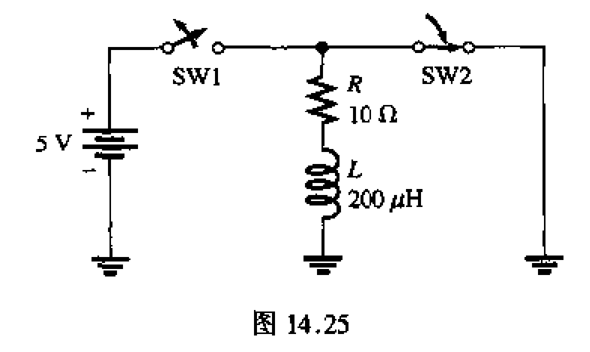


图 14.25

解: (a) $\tau = \dfrac{L}{R} = \dfrac{200\ \mu\text{H}}{10\ \Omega} = \mathbf{20\ \mu s}$

(b) 电感中的电流不能瞬时改变。因此,开关改变的瞬间电流保持不变。

$$I = \frac{5\text{ V}}{10\ \Omega} = \mathbf{500\ mA}$$

(c) 在 1τ 时,电流降为初始值的 37%。

$$i = 0.37(500\text{ mA}) = \mathbf{185\ mA}$$

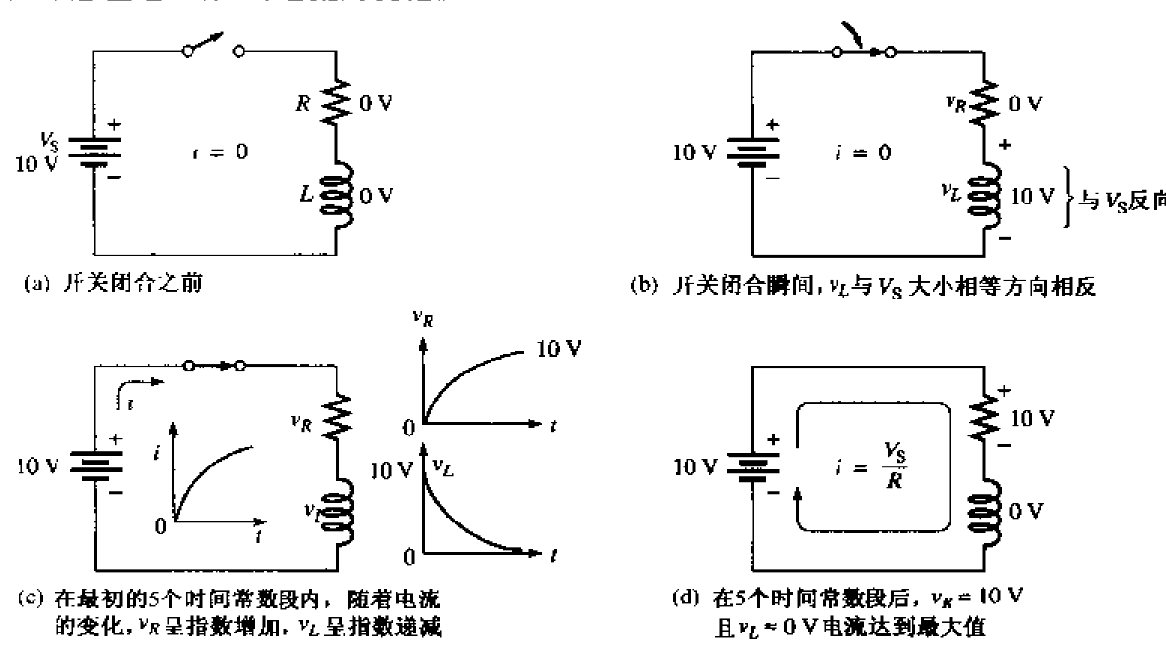
练习: 将图 14.25 中的 R 改为 47 Ω, L 改为 1 mH,重复以上计算。

14.5.4 *RL* 串联电路的感应电压

如上所述,电感元件中电流的变化产生感应电压。现研究电流发生变化时串联电路中的电阻和线圈上的电压如何改变。

参见图 14.26(a)中的电路。开关打开时没有电流,电阻和线圈的电压都为 0。开关闭合的瞬间,如图 14.26(b)所示,电阻上的瞬时电压(v_L)是 0 V,电感元件上的电压(v_R)是 10 V。发生这种变化的原因是线圈中产生的感应电压等于电源电压且与电源电压的作用相反,阻碍电流瞬时变化。因而开关闭合瞬间电感元件对电压相当于开路。

开始的 5 个时间常数段内,电流呈指数级增加,感应电压减少,电阻上的电压随着电流而增加。5 倍时间常数段后,电流达到终值 V_S/R。这时所有电压都在电阻上,线圈上没有任何电压。因此,电感元件对恒定的电流相当于短路,如图 14.26(d)所示。切记电感元件只对变化的电流才能产生感应电压,阻碍电流的变化。



(a) 开关闭合之前

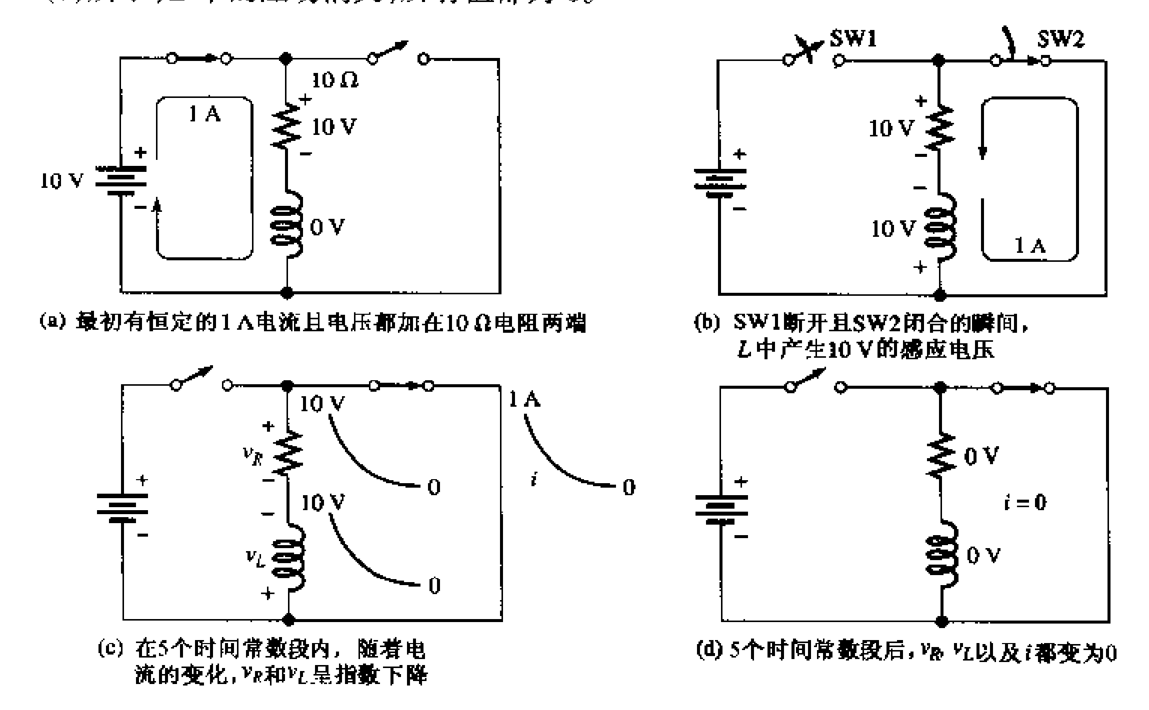
(b) 开关闭合瞬间,v_L 与 V_S 大小相等方向相反

(c) 在最初的5个时间常数段内,随着电流的变化,v_R 呈指数增加,v_L 呈指数递减

(d) 在5个时间常数段后,v_R = 10 V 且 $v_L \approx$ 0 V 电流达到最大值

图 14.26 电路中的电压为感应电压,绕线电阻忽略不计

现在用图 14.27 举例说明,图中开关断开前电流达到稳定状态,然后通过另一回路放电。图 14.27(a)是电路的稳定状态,图 14.27(b)显示打开开关 1 断开电源的瞬间合上开关 2,电感放电的回路。在此之前,L 中的电流为 1 A。注意 L 中产生 10 V 的感应电压,可以保持 1 A 的电流,使电流瞬时不发生改变。图 14.27(c)中,电流呈指数级减少,v_R 和 v_L 也同样。5τ 后,如图 14.27(d)所示,L 中的磁场消失,所有值都为 0。



(a) 最初有恒定的1 A电流且电压都加在10 Ω电阻两端

(b) SW1断开且SW2闭合的瞬间,L 中产生10 V的感应电压

(c) 在5个时间常数段内,随着电流的变化,v_R 和 v_L 呈指数下降

(d) 5个时间常数段后,v_R、v_L 以及 i 都变为0

图 14.27 RL 电路中电感放电过程中的电压为感应电压,绕线电阻忽略不计

例 14.10　(a) 图 14.28(a)中，开关闭合的瞬间 v_l 的值是多少？ 5τ 后呢？

(b) 图 14.28(b)中，开关打开的瞬间 v_L 的值是多少？ 5τ 后呢？

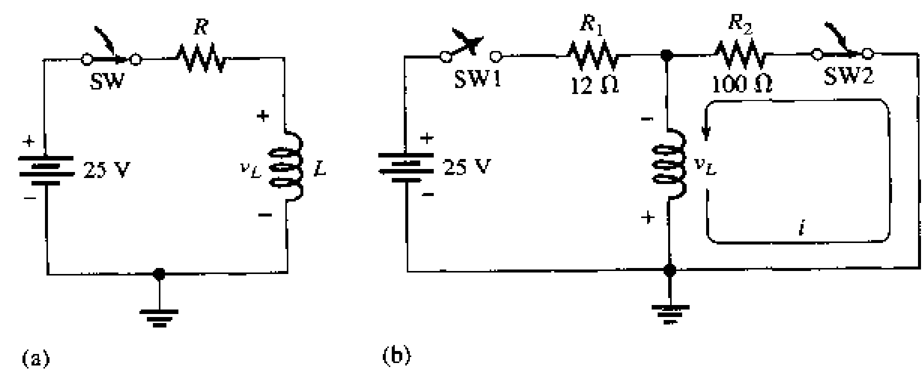


图 14.28

解：(a) 开关闭合的瞬间，所有的电源电压加在 L 上。因此开关 SW 合上时，v_l = **25 V**，极性如图所示 5τ 后，L 短路，v_L = **0 V**。

(b) 开关 1 闭合，开关 2 打开时，稳定电流是：

$$I = \frac{25\ \text{V}}{12\ \Omega} = 2.08\ \text{A}$$

开关切换后，L 中形成了感应电压，暂时保持 2.08 A 的电流。感应电压为：

$$v_L = IR_2 = (2.08\ \text{A})(100\ \Omega) = \mathbf{208\ V}$$

5τ 后，感应电压为 0 V。

练习：电源电压改为 9 V，重新计算(a)。如果 R_1 是 27 Ω，电源电压是 25 V，重新计算(b)。

14.5.5　指数形式公式

RL 电路中，幂指数形式的电流和电压公式与第 13 章中 RC 电路的公式类似，而且图 13.35 中通用幂指数函数的图形也适用于电感元件，和电容一样。RL 电路的通用计算公式表示如下：

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-Rt/L} \tag{14.11}$$

$$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-Rt/L} \tag{14.12}$$

V_F 和 I_F 是电压和电流终值，V_i 和 I_i 是电压和电流的初始值。小写字母 v 和 i 是电感元件的电压和电流随时间变化的瞬时值。

增加的电流　该公式适用于电流从 0 开始呈指数级增加的情况。

$$i = I_F(1 - e^{-Rt/L}) \tag{14.13}$$

用式(14.13)可以计算出任意时间增加的感应电流。可以将式中的 i 替换为 v，I_F 替换为 V_F，从而计算出电压值。

例 14.11　计算图 14.29 中开关闭合 30 μs 时的感应电流。

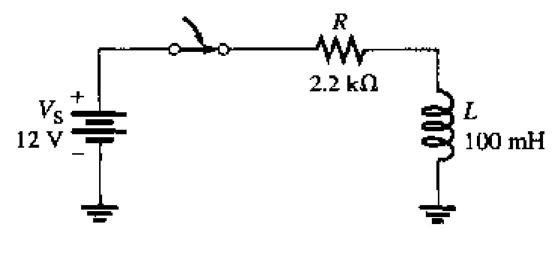


图 14.29

解：时间常数为：

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{100\ \text{mH}}{2.2\ \text{k}\Omega} = 45.5\ \mu\text{s}$$

电流终值为：

$$I_F = \frac{V_S}{R} = \frac{12\ \text{V}}{2.2\ \text{k}\Omega} = 5.45\ \text{mA}$$

初始电流为零。注意 30 μs 小于一个时间常数,因此在这一时刻的电流值达不到最终值的 63%。

$$i_L = I_F(1 - e^{-Rt/L}) = 5.45\ \text{mA}(1 - e^{-0.66}) = 5.45\ \text{mA}(1 - 0.517) = \mathbf{2.63\ mA}$$

练习:计算图 14.29 中开关闭合 55 μs 时的感应电流。

减少的电流 下式适用于电流呈指数级减少,而且终值电流为 0 的情况。

$$i = I_i e^{-Rt/L} \tag{14.14}$$

这个公式可以用于计算任何时刻的电流,参见下面的例题。

例 14.12 计算图 14.30 中开关改变(打开开关 1 的同时合上开关 2)后 2 ms 时的感应电流。

解:非激励时间常数为:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{200\ \text{mH}}{56\ \Omega} = 3.57\ \text{ms}$$

电感中的初始电流是 89.3 mA。注意 2 ms 小于一倍时间常数,所以电流的减少小于 63%。因此,电流大于初始值的 37%。

$$i = I_i e^{-Rt/L} = (89.3\ \text{mA})e^{-0.56} = \mathbf{51.0\ mA}$$

练习:将电源电压改为 10 V,计算图 14.30 中开关改变后 6 秒时的感应电流。

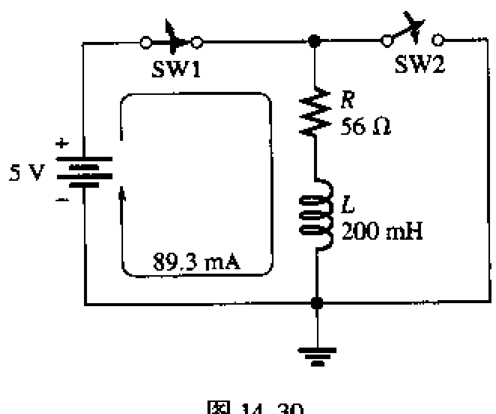


图 14.30

14.5 节练习

1. 一个 15 mH 的电感元件,绕线电阻是 10 Ω,通有 10 mA 的直流电。电感元件上的电压降是多少?
2. 一个 20 V 的直流电源连接在 *RL* 串联电路中。电路中开关闭合的瞬间,v_R 和 v_L 是多少?
3. 在与第 2 题相同的电路中,开关闭合后 5τ 时,v_R 和 v_L 是多少?
4. *RL* 串联电路中,$R = 1.0\ \text{k}\Omega$,$L = 500\ \mu\text{H}$,时间常数是多少?计算将其连在 10 V 电源上后 0.25 μs 时的电流。

14.6 交流电路中的电感元件

本节将介绍有交流电通过时电感的感抗,感抗由交流电的频率决定。转换的概念在第 13 章提到过,电感元件中感应电压的计算在式(14.1)中已经给出,本节中将会用到。

学完本节后,读者应该能够:

- 分析电感交流电路
- 解释电感元件中电压和电流为什么会产生相移
- 定义感抗
- 计算给定电路的感抗
- 讨论电感的瞬时功率、有功功率和无功功率

14.6.1 电感元件中电压和电流的相位关系

从感应电压的式(14.1)中可以看出,电感元件中电流变化得越快,感应电压越大。例如,如果电流变化率为 0,感应电压也为 0[$v_{ind} = L(di/dt) = L(0) = 0\ \text{V}$]。当 di/dt 为正向变化的最大值时,v_{ind}是正向最大值;当 di/dt 为负向变化的最大值时,v_{ind}是负向最大值。

电感电路中正弦电流形成正弦感应电压。若知道了电流曲线，就可以确定感应电压哪一点处为零，哪一点处为最大值，相位关系如图 14.31(a)所示。注意，电压比电流超前 90°。这个关系在纯感应电路中总是成立的。电压和电流的相位图参见图 14.31(b)。

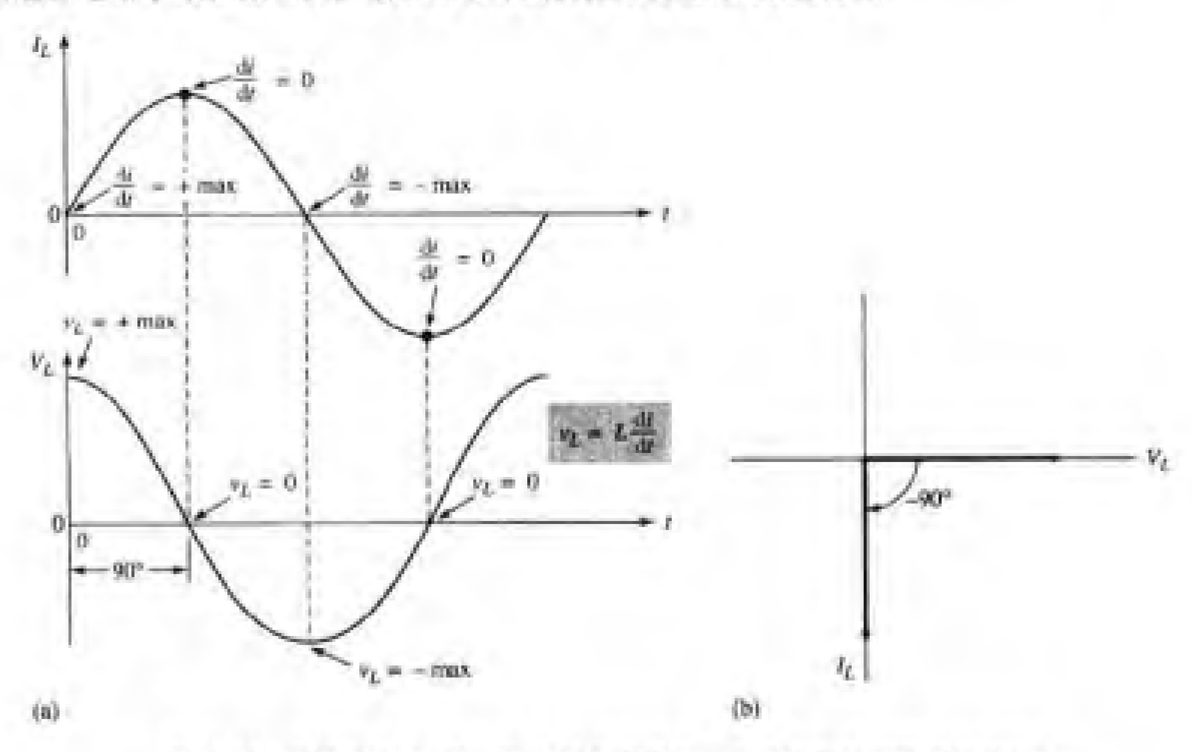


图 14.31　电感电压 V_L 和电流 I_L 的相位关系。电感电流总是滞后电压 90°

14.6.2　感抗

感抗表示对正弦电流的阻碍，单位是欧姆。感抗的符号表示为 X_L。

用关系式 $v_{ind}=L(di/dt)$和图 14.32 中的曲线推导 X_L 的公式。电流变化速率和频率直接相关，频率越大，电流变化越快。从图 14.32 中可以看出，曲线 A 在 0 点的斜率比曲线 B 的斜率大，曲线上某点的斜率表示该点处的变化率。因此，正弦曲线 A 比 B 的频率高，即最大变换率的值较大(0 点处 di/dt 较大)。

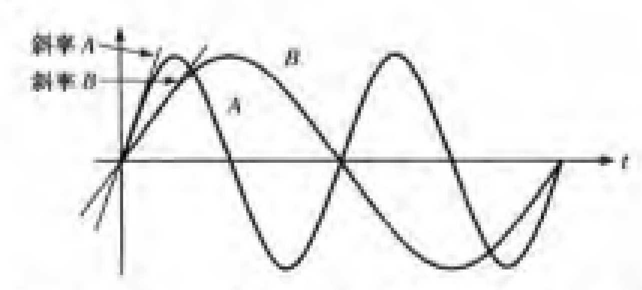


图 14.32　斜率代表变化率，波形 A 在 0 点的斜率大于波形 B 的斜率，因此 A 有较高的频率

频率增大，di/dt 增大，v_{ind}增大。频率减小，di/dt 减小，v_{ind}减小。感应电压由频率直接决定。

$$\overset{\uparrow}{v_{ind}} = L(\overset{\uparrow}{di/dt}) \quad 并且 \quad \underset{\downarrow}{v_{ind}} = L(\underset{\downarrow}{di/dt})$$

感应电压增加意味着电流变化时的阻碍作用增大(X_L 增大)。因此,感抗与感应电流电压成正比,也就是和频率成正比。

X_L 和 f 成比例。

现在如果 di/dt 为常量,电感改变,L 增加则使 v_{ind} 增加,L 减小,则使 v_{ind} 也减小。

$$\overset{\uparrow}{v_{ind}} = \overset{\uparrow}{L}(di/dt) \quad 并且 \quad \underset{\downarrow}{v_{ind}} = \underset{\downarrow}{L}(di/dt)$$

同样,v_{ind} 的增加表示阻碍作用增大(X_L 增大)。因此,X_L 与感应电压成正比,即与电感成正比。感抗与 f 和 L 成正比。

X_L 和 fL 成比例。

感抗的完整表达式(推导参见附录 C)如下:

$$X_L = 2\pi fL \tag{14.15}$$

f 的单位是赫兹,L 的单位是亨时,感抗 X_L 的单位是欧姆。和容抗一样,表达式中常系数 2π 来自于正弦曲线坐标变换。

例 14.13 如图 14.23 所示,电路中输入正弦电流,频率是 1 kHz。计算感抗。

解: $1\ kHz = 1 \times 10^3\ Hz$,$5\ mH = 5 \times 10^{-3}\ H$,感抗为:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1 \times 10^3\ Hz)(5 \times 10^{-3}\ H) = \mathbf{31.4\ \Omega}$$

练习: 图 14.33 中频率增加到 3.5 kHz 时,X_L 是多少?

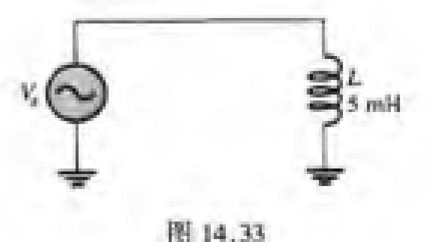


图 14.33

14.6.3 分析交流电感电路

如上所述,交流电感电路中电流比电压滞后 90°。若输入电压参考相位为 0°,可以用极坐标形式 $V_s\angle 0°$ 表示。电流用极坐标表示为 $I\angle -90°$,用直角坐标表示为 $-jI$,如图 14.34所示。

在有感抗的交流电路中应用欧姆定律,需要用 $\mathbf{X}_L$ 替换 R。由于引入了相位角,结果表示为复数。图 14.34 中的电路应用欧姆定律得到以下结果:

图 14.34

$$\mathbf{X}_L = \frac{V_s\angle 0°}{I\angle -90°} = \left(\frac{V_s}{I}\right)\angle 90°$$

从式中可以看出,$\mathbf{X}_L$ 的值有 90°的相位角,可以写成 $X_L\angle 90°$ 或 jX_L。

例 14.14 计算图 14.35 中的正弦感应电流。

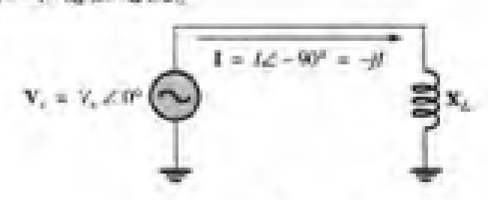


图 14.35

解：10 kHz = 10 × 10³ Hz，100 mH = 100 × 10⁻³ H，计算 X_L 的幅值。

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(10 \times 10^3\ \text{Hz})(100 \times 10^{-3}\ \text{H}) = 6283\ \Omega$$

用极坐标表示：

$$\mathbf{X}_L = 6283\angle 90^\circ\ \Omega$$

用欧姆定律计算正弦感应电流。

$$\mathbf{I}_{rms} = \frac{\mathbf{V}_{rms}}{\mathbf{X}_L} = \frac{5\angle 0^\circ\ \text{V}}{6283\angle 90^\circ\ \Omega} = \mathbf{796\angle -90^\circ\ \mu A}$$

练习：计算图 14.35 中满足下列条件时的电流值：$V_{rms} = 12\angle 0^\circ$ V，$f = 4.9$ kHz，$L = 680\ \mu$H。

14.6.4 电感元件的能量

前面讨论到电感元件中有电流通过时在磁场中存储能量。理想的电感元件(假设没有绕线电阻)只存储能量，而不消耗能量。理想电感元件上加上交流电压，电感元件在一个周期的部分时间内存储能量，然后再释放能量。理想电感元件的能量转化过程中没有热能损耗。图 14.36 显示了从电感元件的电压和电流曲线得到的功率曲线。

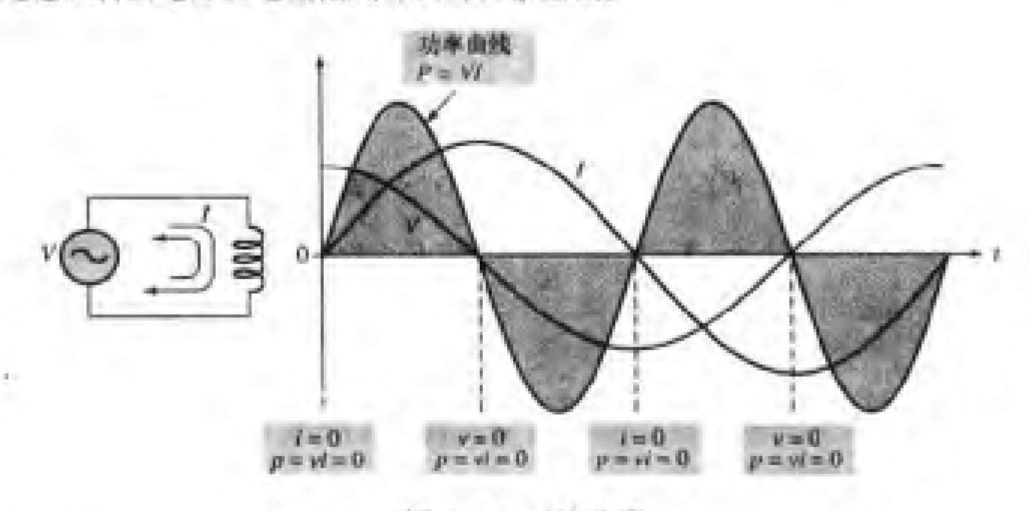


图 14.36 功率曲线

瞬时功率(p) v 和 i 决定瞬时功率。在 v 和 i 为 0 的点，p 也为 0。当 v 和 i 都为正时，p 为正；v 和 i 一正一负时，p 为负；当 v 和 i 都为负时，p 为正。如图 14.36 所示，功率遵循正弦曲线。功率为正表示电感元件存储能量，功率为负表示电感元件释放能量。注意能量存储和释放的频率是电压和电流频率的两倍。

有功功率(P_{true}) 理想情况下，电感元件在正半周期将全部能量存储起来，在负半周期全部释放。电感元件的能量转化过程中没有热能损耗，所以有功功率是 0。实际上，因为电感元件绕线电阻的存在，总会损耗一些能量。这种能量损耗很少，通常可以忽略不计。

$$P_{true} = (I_{rms})^2 R_W \tag{14.16}$$

无功功率(P_r) 电感元件存储和释放能量的速率称为无功功率，单位是 VAR。因为任何时候电感元件或是存储能量或是释放能量，所以电感元件中的无功功率是不为零的。无功功率不等于能量转换过程中的热能损耗。其计算公式如下：

$$P_r = V_{rms} I_{rms} \tag{14.17}$$

$$P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_L} \quad (14.18)$$

$$P_r = I_{rms}^2 X_L \quad (14.19)$$

例 14.15 一 10 mH 的线圈中加上幅值为 10 V，频率为 1 kHz 的正弦信号作用于电感两端，绕线电阻可以忽略。计算无功功率。

解：首先计算感抗和电流。

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1\ \text{kHz})(10\ \text{mH}) = 62.8\ \Omega$$

$$I = \frac{V_S}{X_L} = \frac{10\ \text{V}}{62.8\ \Omega} = 159\ \text{mA}$$

用式(14.19)：

$$P_r = I^2X_L = (159\ \text{mA})^2(62.8\ \Omega) = \mathbf{1.59\ VAR}$$

练习：如果频率增加，无功功率会有什么变化？

14.6.5 线圈的品质因数

品质因数 Q 是电感元件的无功功率和线圈的绕线电阻或是和线圈串联的电阻上有功功率的比值，是 L 中能量和 R_W 中能量的比。品质因数在第 18 章介绍的谐振电路中非常重要。Q 的计算公式如下：

$$Q = \frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}} = \frac{I^2X_L}{I^2R_W}$$

在串联电路中，L 和 R 中的电流相同，因此消去 I^2，得到：

$$Q = \frac{X_L}{R_W} \quad (14.20)$$

当电路的电阻等于线圈的绕线电阻时，电路的 Q 和线圈的 Q 相同。注意 Q 是相同单位的比值，因此 Q 本身没有单位。

14.6 节练习

1. 叙述电感元件中电压和电流的相位关系。
2. 计算 $f = 5$ kHz，$L = 100$ mH 时的感抗。
3. 频率为多少时，50 μH 的电感元件中感抗是 800 Ω?
4. 计算图 14.37 中电流的有效值。

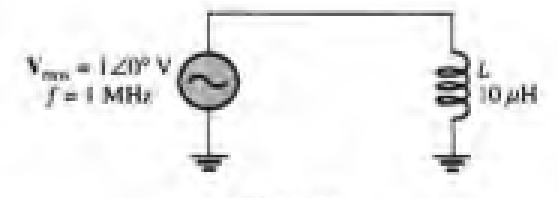


图 14.37

5. 50 mH 理想的电感元件连在有效值为 12 V 的正弦电压上，此时有功功率是多少？频率为 1 kHz 时的无功功率是多少？

14.7 电感的应用

电感元件的应用不如电容广泛，并且受到型号、费用等因素的制约。然而，正如第 10 章中讨论的，电感(线圈)在实际中的用途也不少，继电器、螺线管、收音机和电视摄像头等元件均应用线圈的电磁现象。本节将介绍电感的一些应用。

学完本节后，读者应该能够：

- 讨论电感的一些应用
- 叙述电源滤波器
- 解释 RF 扼流圈
- 讨论基本的调谐电路

14.7.1 电源滤波器

第 13 章中将电容用在直流电源滤波器中，最后输出的电压只有很小的波动。一些电源的滤波器中使用的是电感。如图 14.38(a)所示，使波动电压变得平滑。电感的位置如图所示，可以阻碍电压的波动，最后通过负载的电压几乎为恒定电压，如图 14.38(b)所示。

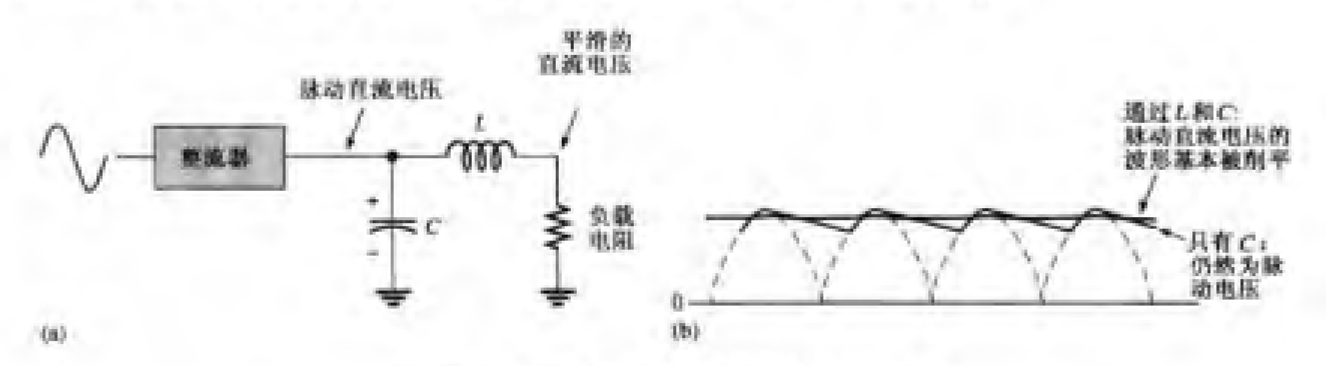


图 14.38 带串联电感的基本电容电源滤波器

14.7.2 RF 扼流圈

一种类型的电感叫扼流圈，用于抑制高频分量进入系统。例如，电源或收音机中的高频部分就属于这种情况。其中，电感用做一个串联滤波器，遏制线路上接收到的干扰信号。这种过滤作用基于线圈的感抗随着频率而增加。电流的频率很高时，线圈的感抗很大，基本上能阻碍电流。RF 扼流圈中电感的应用参见图 14.39。

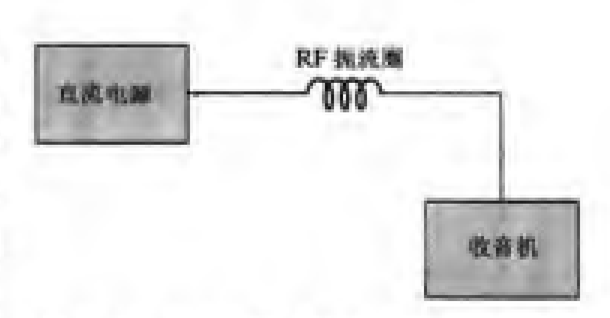


图 14.39 应用于 RF 扼流圈中的电感主要用来遏制线路上接收到的干扰信号

14.7.3 调谐电路

电感和电容在通信电路中提供频选电路。这种调谐电路允许频带内的信号通过，其余频带外的信号将被滤掉。电视、收音机都应用了这个原理，这样人们才能收到想要的节目和电台。

频率选择建立在电容和电感的电流都为频率的函数，以及串联和并联电路中的两个电抗相互作用的基础上。容抗和感抗有相反的相位变化，从而联合起来阻碍电流的变化，能够得到所需频率的响应。调谐 *RLC* 电路在第 18 章介绍。

14.7 节练习

1. 解释电感元件如何减少电源滤波器的波动电压。
2. 电感在串联电路中如何起到 RF 扼流圈的作用？

14.8　电感的测试

本节中将介绍电感元件两种常见的故障和测试方法。

学完本节后，读者应该能够：

- 测试电感元件
- 用欧姆表测试绕线开路
- 讨论绕线短路的后果

电感元件最常见的故障是开路。测试开路时，应将电感元件从电路中取出。如果开路，用欧姆表测试时指针将指向无穷大处，如图 14.40(a)所示。如果线圈完好，欧姆表指出绕线的电阻值。绕线的电阻值取决于绕线和线圈的长度，可能是 1 欧姆，也可能是几百欧姆。图 14.40(b)所示为线圈完好时的读数。

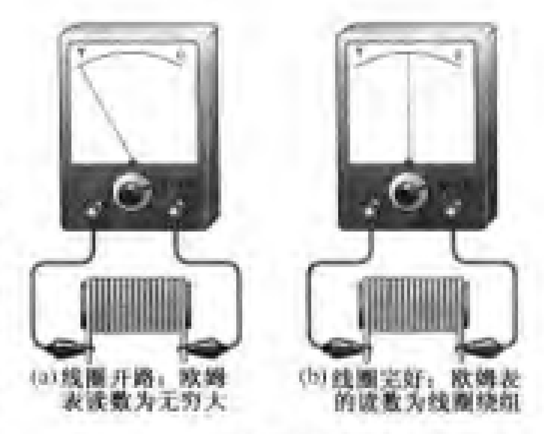


图 14.40　通过测试电阻检查线圈

有时，电感元件中的电流超过极限电流，导线的绝缘材料融化，几匝导线可能短路。这种现象很少见，必须用 *LCR* 仪表测量。因为两匝(或多匝)导线短路时，用欧姆表测量的读数和完好时一样，仍是线圈的阻值。通常，少数几匝导线短路对电路的影响不大。如果所有的绕线都短路，线圈的电阻为 0。

14.8 节练习

1. 测试线圈时，欧姆表的读数为无穷说明部分绕线短路。(对与错)
2. 用欧姆表测量一个完好的线圈时，读出的是电感值。(对与错)

技术实践

在技术实践中，将介绍如何用方波发生器和示波器测量线圈的电感值。给出两个电感未知的线圈，要求用简单的实验仪器测出其电感值。方法是将线圈和一个已知阻值的电阻串联，测出其时间常数。知道了时间常数和电阻值，可以计算出 L 的值。

测量时间常数的方法是将方波发生器接入电路，测试电阻上的电压。方波电压为高电平时，电感元件充电响应；方波电压返回零时，电感元件放电响应，电阻电压增加到终值所用的时间大约为 5 倍时间常数。实验电路参见图 14.41。为保证绕线电阻可以忽略，必须测量该电阻，并使电路中所用的电阻阻值远远大于绕线电阻。

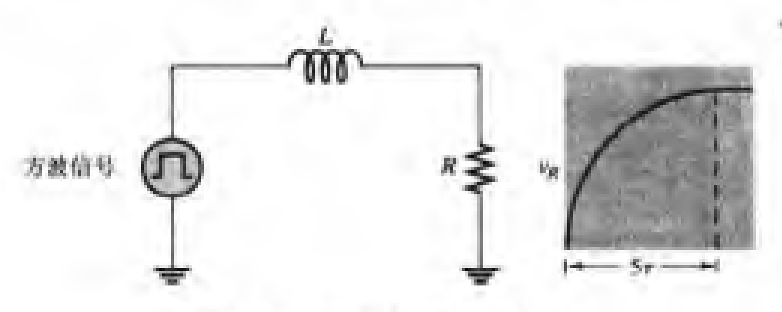


图 14.41　测量时间常数的电路

绕线电阻

假设已经用欧姆表测出图 14.42 中线圈的绕线电阻为 85 Ω。为了使计算时间常数时绕线电阻可以忽略，电路中用了 10 kΩ 的串联电阻。

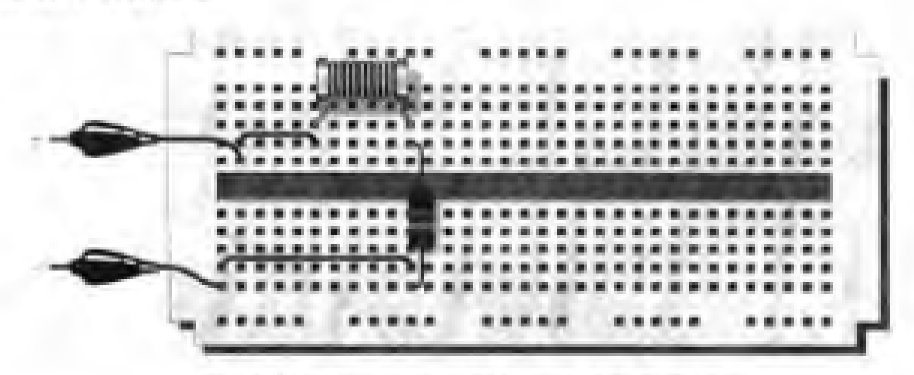


图 14.42 测量时间常数的电路试验板设置

- 如果电路中加的是 10 V 直流电压，那么 $t = 5\tau$ 时的电流是多少？

线圈 1 的电感

参见图 14.43，为了测量线圈 1 的电感，电路中加上了方波。将方波的振幅调成 10 V。调整方波的频率，使一个方波周期内，电感元件的充电充分完成。用示波器观察电感元件的充电曲线。

- 近似计算充电时间常数。
- 计算线圈 1 的电感。

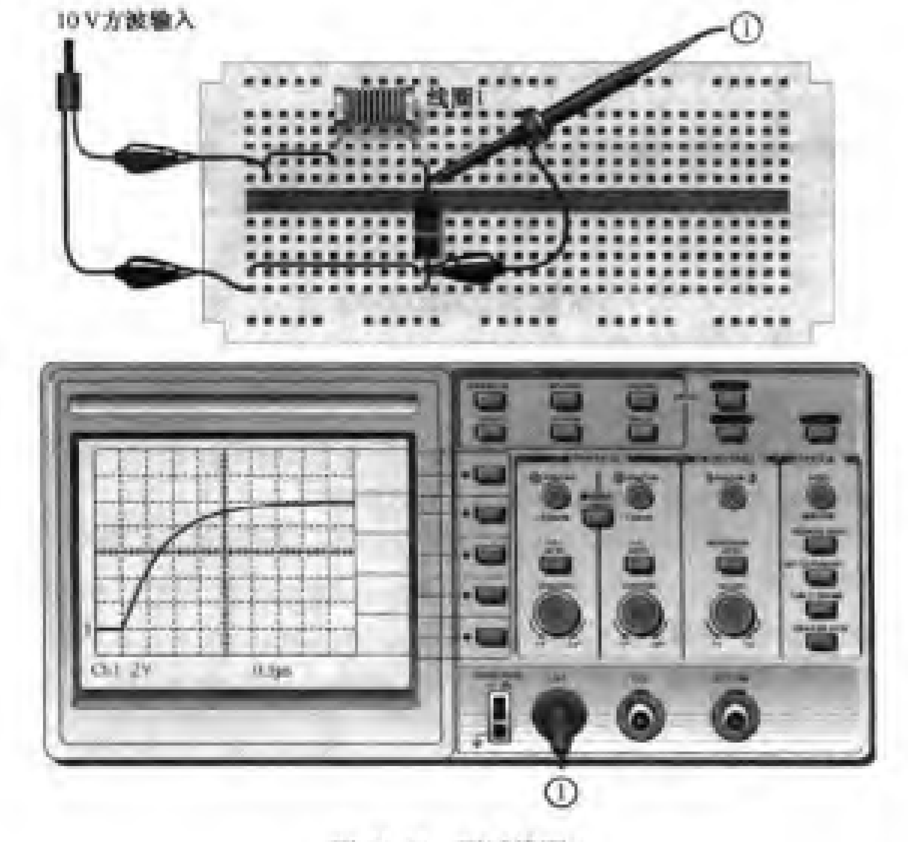


图 14.43 测试线圈 1

线圈 2 的电感

图 14.44 中用线圈 2 替换了线圈 1。为计算电感，在电路试验板上加上 10 V 的方波。调整方波的频率，使一个方波周期内电感元件的充电充分完成。用示波器观察电感元件充电的曲线。

- 近似计算充电时间常数。
- 计算线圈 2 的电感。
- 讨论用这种方法测量的难点。
- 说明用正弦曲线代替方波时，如何计算电感。

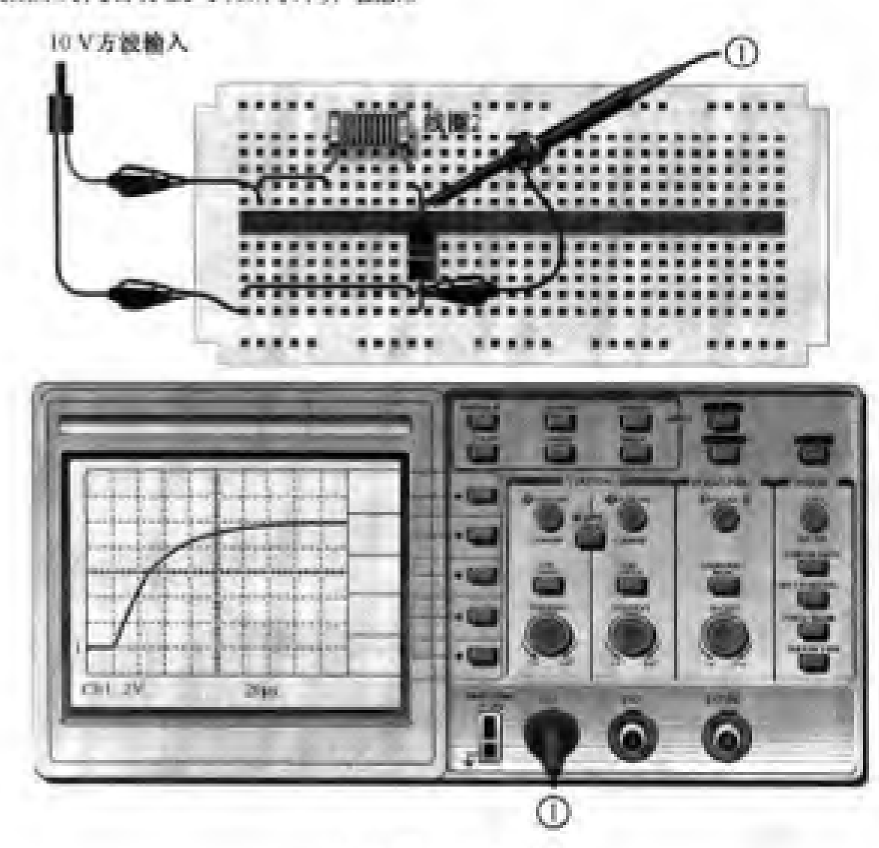


图 14.44　测试线圈 2

技术实践测验

1. 图 14.43 中方波可以使用的最大频率是多少？
2. 图 14.44 中方波可以使用的最大频率是多少？
3. 如果频率超过第 1 题和第 2 题中的最大频率会有什么影响？

小结

- 电感是线圈中电流变化时形成感应电压的能力度量。
- 电感元件阻碍自身电流的变化。
- 法拉第定律说明磁场和线圈的相对运动产生感应电压。
- 感应电压的大小和电感、磁场的变化率成正比。
- 楞次定律说明感应电压的极性是使感应电流能够阻碍产生该感应电压磁场的变化。
- 电感元件的能量存储在磁场中。
- 1 亨是电流以 1 安培每秒的速率变化，产生 1 伏感应电压时的电感值。
- 电感和线圈匝数的平方、心体的磁导率以及横截面积成正比，和心体的长度成反比。

- 心体材料的磁导率是该材料形成磁场能力的表示。
- 串联 *RL* 电路的时间常数等于电感除以电阻。
- 在 *RL* 电路中，充电和放电时电感中的电压和电流在每次时间常数间隔内变化63%。
- 充电和放电变化遵循幂函数曲线。
- 串联电路中电感相加。
- 并联电路中总电感小于各个电感中的最小值。
- 电感元件中电压比电流超前90°。
- 感抗和频率、电感成正比。
- 电感元件的有功功率是0。就是说，理想电感元件的能量转换过程中没有热能损耗，只有在绕线电阻上才有能量转换成热能。

主要术语

亨[利](H)：电感的单位。

感应电压：磁场中的电流变化时产生的电压。

电感：电感元件中电流变化产生感应电压阻碍电流变化的能力。

感抗：电感元件对正弦电流的阻碍，单位是欧姆。

电感元件：心体外绕上导线所制成能够产生感应电压的电子元件，也称为线圈。

品质因数(Q)：无功功率和有功功率的比。

***RL* 时间常数**：由 L 和 R 决定的固定时间间隔，决定电路的时域响应。

绕线：电感元件中导线的圈数或匝数。

公式

编号	公式	说明
14.1	$v_{\text{ind}} = L\left(\frac{di}{dt}\right)$	感应电压
14.2	$W = \frac{1}{2}LI^2$	电感元件储能
14.3	$L = \frac{N^2\mu A}{l}$	电感的物理参数表达式
14.4	$v_{\text{ind}} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$	法拉第定律
14.5	$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_n$	串联电感
14.6	$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \cdots + \frac{1}{L_n}$	并联电感的倒数
14.7	$L_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_1}\right) + \left(\frac{1}{L_2}\right) + \left(\frac{1}{L_3}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{L_n}\right)}$	并联电感
14.8	$L_T = \frac{L_1L_2}{L_1 + L_2}$	两个电感元件并联的总电感
14.9	$L_T = \frac{L}{n}$	等值电感元件并联的总电感
14.10	$\tau = \frac{L}{R}$	时间常数
14.11	$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-Rt/L}$	指数型电压(通式)
14.12	$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-Rt/L}$	指数型电流(通式)

14.13 $i = I_F(1 - e^{-Rt/L})$ 从0开始增加的指数型电流

14.14 $i = I_i e^{-Rt/L}$ 减少到0的指数型电流

14.15 $X_L = 2\pi fL$ 感抗

14.16 $P_{true} = (I_{rms})^2 R_W$ 有功功率

14.17 $P_r = V_{rms} I_{rms}$ 无功功率

14.18 $P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_L}$ 无功功率

14.19 $P_r = I_{rms}^2 X_L$ 无功功率

14.20 $Q = \frac{X_L}{R_W}$ 品质因数

自测题

1. 0.05 μH 的电感大于:
   (a) 0.000 000 5 H (b) 0.000 005 H (c) 0.000 000 005 H (d) 0.000 05 mH
2. 0.33 mH 的电感小于:
   (a) 33 μH (b) 330 μH (c) 0.05 mH (d) 0.0005 H
3. 通过电感元件的电流增加,磁场中的能量将:
   (a) 减少 (b) 不变 (c) 增加 (d) 加倍
4. 电感元件中的电流增为原来的2倍时,储能为原来的:
   (a) 2倍 (b) 4倍 (c) 1/2 (d) 不变
5. 以下哪种方法能够减小线圈的绕线电阻?
   (a) 减少线圈匝数 (b) 使用较粗的导线 (c) 改变心体材料 (d) (a)或(b)
6. 采用以下哪种方法能使铁心线圈的电感增加?
   (a) 增加匝数 (b) 移走铁心 (c) 增加铁心的长度 (d) 使用更粗的导线
7. 4个10 mH 的电感元件并联,总电感是:
   (a) 40 mH (b) 2.5 mH (c) 40 000 μH (d) (a)和(c)
8. 1 mH,3.3 mH 和 0.1 mH 的电感并联,总电感是:
   (a) 4.4 mH (b) 大于 3.3 mH (c) 小于 0.1 mH (d) (a)和(b)
9. 一个电感元件,一个点组和一个开关并联于 12 V 的电源。开关合上的瞬间,感应电压是:
   (a) 0 V (b) 12 V (c) 6 V (d) 4 V
10. 电感元件上加上正弦电压,电压频率增加时,电流将:
    (a) 减小 (b) 增加 (c) 不变 (d) 立刻变为0
11. 电感、电阻和正弦电源串联,频率正好使感抗和电阻相等。如果频率增大,则:
    (a) $V_R > V_L$ (b) $V_L < V_R$ (c) $V_L = V_R$ (d) $V_L > V_R$
12. 一块欧姆表接在电感元件的两端,指针指向无穷,则电感元件:
    (a) 完好 (b) 开路 (c) 短路 (d) 有感抗

故障检修测验

参见图 14.49

1. 如果 R 由 1.0 kΩ 换为 10 kΩ,将开关闭合,电流达到最大值所用的时间将:
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 不变
2. 如果 L 从 10 mH 减少到 1 mH,开关闭合,时间常数将:
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 不变

参见图 14.53

3. 开关从位置 1 转到位置 2 时，L 中的电流将：

   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

4. 开关从位置 2 转到位置 1 时，L 中的电流将：

   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

参见图 14.54

5. 如果开关 1 打开，开关 2 闭合，电路时间常数将：

   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

参见图 14.55

6. 如果电压源频率增加，总电流将：

   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

7. 如果 L_2 开路，L_1 中的电流将：

   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

8. 如果电压源的频率减少，通过 L_2 和 L_3 的电流值的比值将：

   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

参见图 14.56

9. 如果电压源的频率增加，L_1 的电压将：

   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

10. 如果 L_2 开路，L_2 的电压将：

   (a) 增加　(b) 减少　(c) 不变

习题(标有 * 的习题难度较大，奇数号习题的答案见本书的最后)

14.1 节　基本电感元件

1. 将下列值转换成毫亨：

   (a) 1 H　(b) 250 μH　(c) 10 μH　(d) 0.0005 H

2. 将下列值转换成微亨：

   (a) 300 mH　(b) 0.08 H　(c) 5 mH　(d) 0.000 45 mH

3. 当 $di/dt = 10$ mA/μs，$L = 5$ μH 时，线圈的感应电压是多少？
4. 25 mH 的线圈产生了 50 V 感应电压，电流变化率是多少？
5. 100 mH 的线圈中电流变化率是 200 mA/s，感应电压是多少？
6. 线圈心体横截面积为 10×10^{-5} m²，长度为 0.05 m，心体磁导率为 1.2×10^{-6} H/m。要使电感为30 mH，匝数应该是多少？
7. 将 12 V 的电源加在绕线电阻为 12 Ω 的线圈上，线圈中的电流是多少？
8. 100 mH 的电感中有 1 A 的电流时，储能是多少？

14.3 节　电感的串联

9. 5 个电感元件串联，最小的为 5 μH。如果每个电感都是前一个的两倍，并且所有电感按从小到大的顺序相连，求总电感。
10. 假设要得到的总电感为 50 mH。现在只有一个 10 mH 和一个 22 mH 的线圈，还需要多大的电感才能满足要求？
11. 计算图 14.45 中的总电感。
12. 图 14.46 中的开关在各个位置上时点 A 和点 B 之间的总电感是多少？

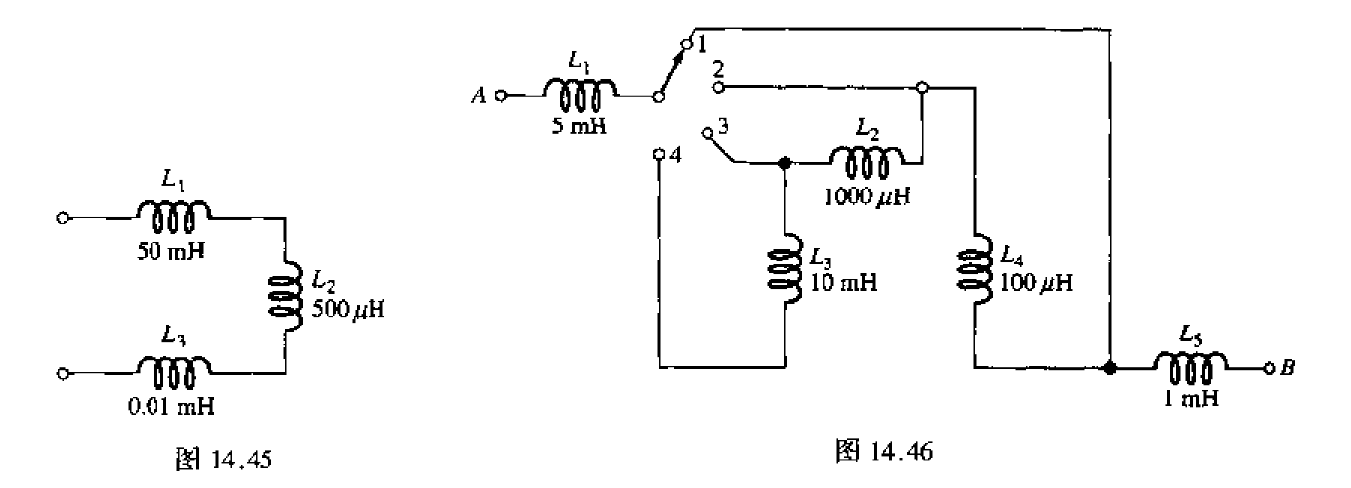


图 14.45

图 14.46

14.4 节　电感的并联

13. 计算给出的电感元件并联的总电感：75 μH，50 μH，25 μH 和 15 μH。

14. 有一个 12 mH 的电感，该值在所有电感值中最小。现在需要一个 8 mH 的电感元件。用多大的电感元件和 12 mH 的电感并联可以得到 8 mH。

15. 计算图 14.47 中的总电感。

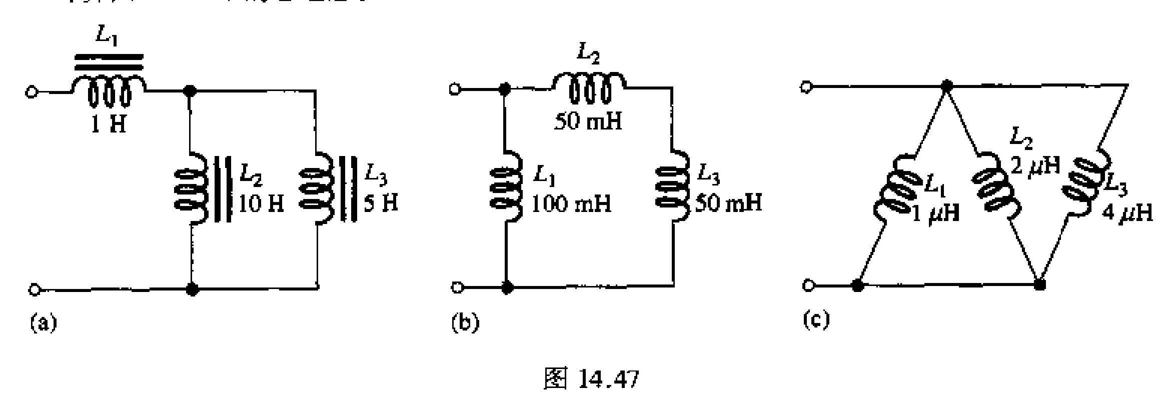


图 14.47

16. 计算图 14.48 中的总电感。

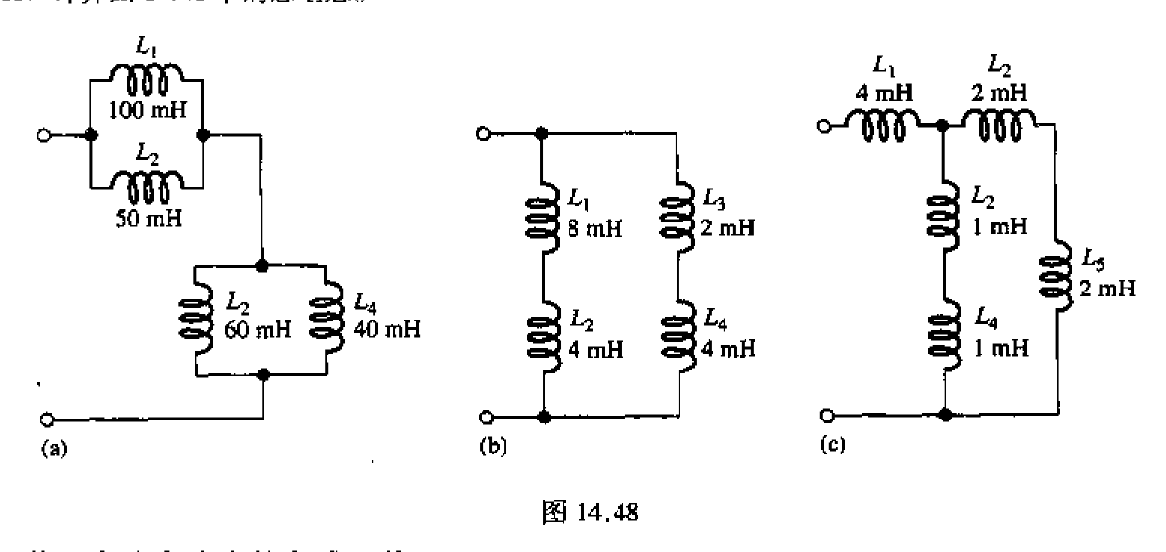


图 14.48

14.5 节　直流电路中的电感元件

17. 计算下列 *RL* 对应的时间常数。

(a) $R = 100\ \Omega, L = 100\ \mu H$　(b) $R = 4.7\ k\Omega, L = 10\ mH$　(c) $R = 1.5\ M\Omega, L = 3\ H$

18. 在 RL 串联电路中,计算下列情况下电流达到最大值所用的时间。

(a) $R = 56\ \Omega, L = 50\ \mu H$ (b) $R = 3300\ \Omega, L = 15\ mH$ (c) $R = 22\ k\Omega, L = 100\ mH$

19. 在图 14.49 所示的电路中,初始时没有电流。计算开关合上下列时间后的感应电压值。

(a) 10 μs (b) 20 μs (c) 30 μs (d) 40 μs (e) 50 μs

*20. 图 14.50 所示的线圈中有 114 mA 的电流。开关 1 打开的同时合上开关 2,下列哪个时刻有感应电压?

(a) 立即就有 (b) 1.7 ms (c) 5.1 ms (d) 6.8 ms

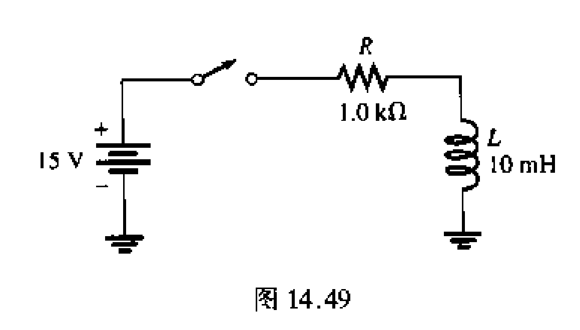


图 14.49

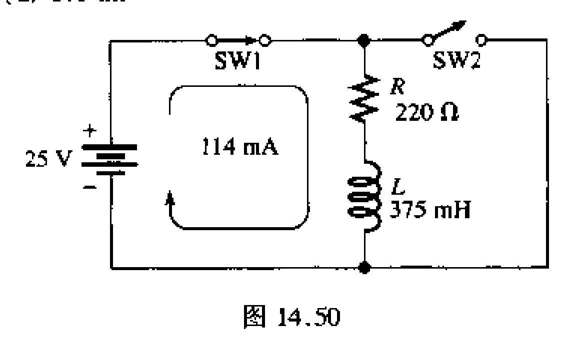


图 14.50

21. 用以下时间重新计算习题 19。

(a) 2 μs (b) 5 μs (c) 15 μs

*22. 用以下时间重新计算习题 20。

(a) 0.5 ms (b) 1 ms (c) 2 ms

23. 图 14.49 中,开关合上多久后感应电压为 5 V?

24. 图 14.51 中开关合上时感应电压的极性如何? 如果 $R_W = 10\ \Omega$,电流的终值是多少?

*25. 计算图 14.52 中的时间常数。

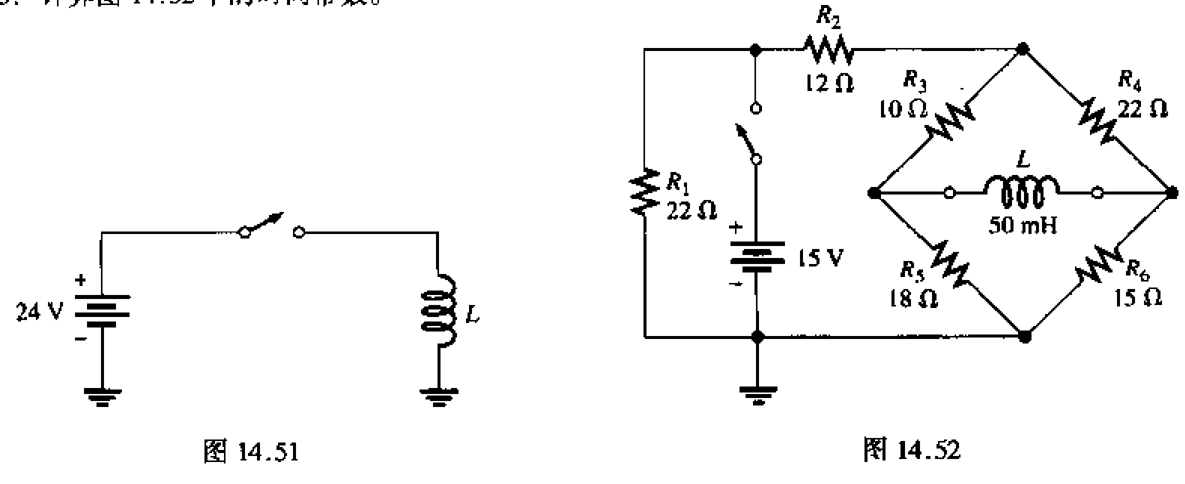


图 14.51

图 14.52

*26. 计算图 14.53 中开关从位置 1 到位置 2 后 10 μs 时的电流。为简单起见,假设开关从位置 1 断开和连到位置 2 是同时的。

*27. 图 14.54 中,开关 1 打开的同时(t_0)开关 2 闭合。求 R_2 在 t_0 时的感应电压。

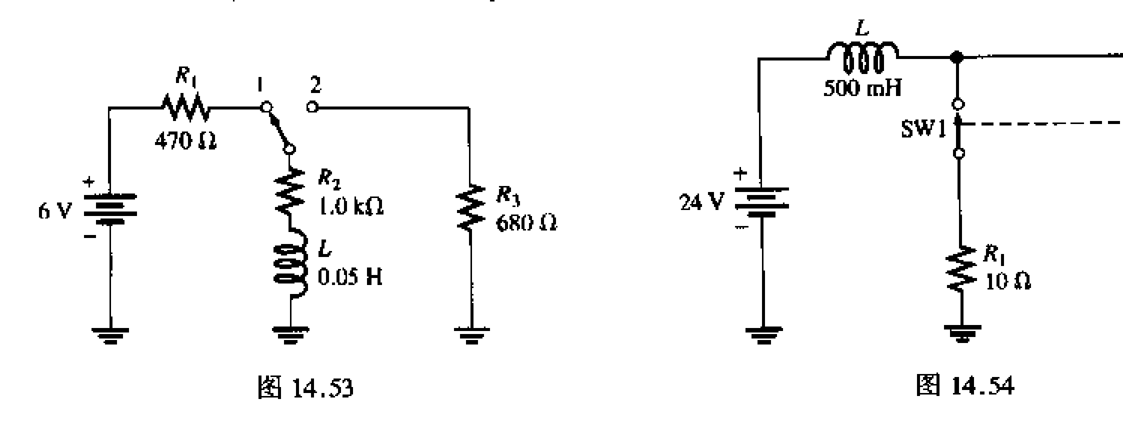


图 14.53

图 14.54

14.6节 交流电路中的电感元件

28. 计算图14.47中各个电路的总感抗，每个电路两端加频率为5 kHz的电压。
29. 计算图14.48中频率为400 Hz时的感抗。
30. 计算图14.55中的总电流有效值 I_{rms}，通过 L_2 和 L_3 的电流是多大？标明所有电流的极性。
31. 图14.48中输入的正弦交流电压为10 V，频率为多少时能使电流 I_{rms} 为500 mA?
32. 计算图14.55中的无功功率。
33. 计算图14.56中的 I_{L2}。

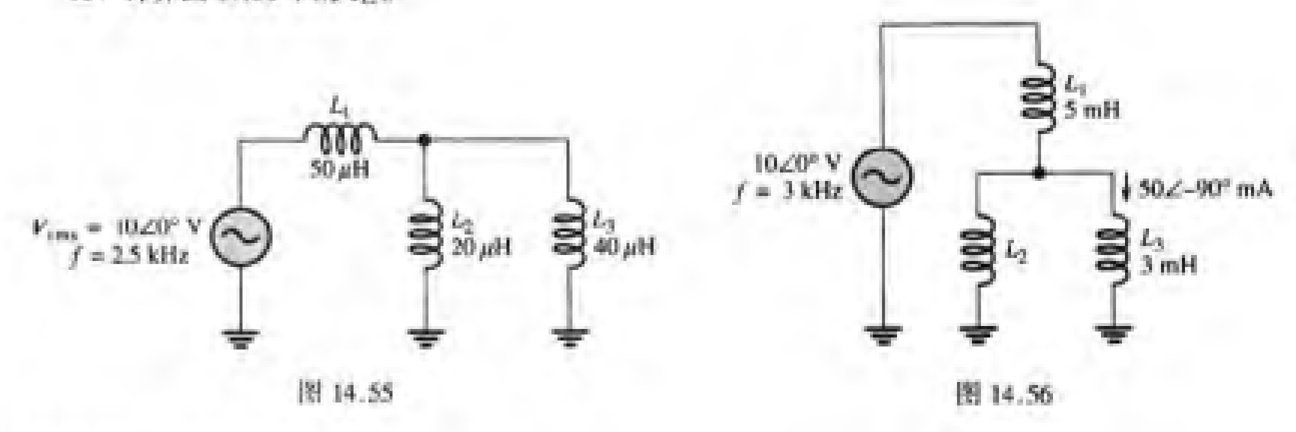


图14.55 图14.56

14.8节 电感的测试

34. 某一个线圈的绕线电阻为5 Ω，用欧姆表测量时指针指向2.8 Ω。该线圈有什么故障吗?
35. 下列线圈故障显示什么迹象?
   (a) 断路 (b) 所有绕线短路 (c) 部分绕线短路

EWB/Multisim 故障检修

完成以下问题需要使用本书附带的EWB/Multisim光盘。

36. 打开文件P14.36，测量每个电感的电压。
37. 打开文件P14.37，测量每个电感的电压。
38. 打开文件P14.38，测量电流。频率变为原来的2倍时，再测量电流。频率减小为原来的1/2时，再测量电流。解释这种现象。
39. 打开文件P14.39，如果文件中是1，看是否有错。
40. 打开文件P14.40，如果文件中是1，看是否有错。

答案

14.1节 基本电感元件

1. 电感取决于线圈的匝数、心体的长度、磁导率和横截面积。
2. v_{ind} = 7.5 mV
3. (a) N增大，L增大
   (b) 心体长度增大，L减少
   (c) 心体的横截面积减少，L减小
   (d) 铁心换成空气心体时，L减小
4. 所有的绕线都有电阻，因为电感由导线绕制而成，导线总有电阻。
5. 线圈中相邻的线圈相当于电容的极板。

14.2 节 电感元件的类型

1. 两种电感:固定式和可变式
2. (a) 空气心体 (b) 铁心 (c) 可变的

14.3 节 电感的串联

1. 串联的电感相加。
2. $L_T = 2.60$ mH
3. $L_T = 5(100$ mH$) = 500$ mH

14.4 节 电感的并联

1. 并联总电感小于最小电感。
2. 对,并联电感的计算和并联电阻相似。
3. (a) $L_T = 7.96$ mH (b) $L_T = 24$ μH (c) $L_T = 100$ mH

14.5 节 直流电路中的电感元件

1. $V_L = IR_W = 100$ mV
2. $v_R = 0$ V, $v_L = 20$ V
3. $v_R = 20$ V, $v_L = 0$ V
4. $\tau = 500$ ns, $i_L = 3.93$ mA

14.6 节 交流电路中的电感元件

1. 电感中电压比电流超前 90°。
2. $X_L = 2\pi fL = 3.14$ kΩ
3. $f = X_L/2\pi L = 2.55$ MHz
4. $\mathbf{I}_{rms} = 15.9\angle -90°$ mA
5. $P_{true} = 0$ W, $P_r = 458$ mVAR

14.7 节 电感的应用

1. 电感减少电压的波动,因为它对电流的变化有阻碍作用。
2. 收音机某些频率的感抗很大,这些频率信号被阻碍。

14.8 节 电感的测试

1. 错,指针指向无穷表明断路。
2. 错,读出的是绕线电阻。

技术实践

1. $f_{max} = 125$ kHz$(5\tau = 4$ ms$)$
2. $f_{max} = 3.13$ kHz$(5\tau = 160$ μs$)$
3. 如果 $f > f_{max}$,电感不会充分激励,因为 $T/2 < 5\tau$。

实例相关练习

14.1 5 H

14.2 10.8 mH

14.3 0.5 Wb/s

14.4 500 μH

14.5 20.3 μH

14.6 (a) 7.30 μH (b) 20 μH

14.7 227 ns

14.8 $I_F = 29.4$ mA, $\tau = 147$ ns

在 $1\tau = 147$ ns, $i = 18.5$ mA

在 $2\tau = 294$ ns, $i = 25.3$ mA

在 $3\tau = 441$ ns, $i = 27.9$ mA

在 $4\tau = 588$ ns, $i = 28.8$ mA

在 $5\tau = 735$ ns, $i = 29.1$ mA

14.9 (a) 21.3 μs (b) 106.4 mA (c) 39.4 mA

14.10 (a) 9 V,0 V (b) 92.6 V,0 V

14.11 3.83 mA

14.12 33.3 mA

14.13 110 Ω

14.14 $573\angle -90°$ mA

14.15 P_r 减小

自测题

1. (c) 2. (d) 3. (c) 4. (b) 5. (d) 6. (a) 7. (d) 8. (c)
9. (b) 10. (a) 11. (d) 12. (b)

故障检修测验

1. (b) 2. (b) 3. (b) 4. (a) 5. (b) 6. (b) 7. (b) 8. (c)
9. (c) 10. (a)

第15章 变 压 器

引言

在第14章，我们已经介绍了自感，建立了自感的概念。在本章，将探讨互感，它是变压器工作的基础。变压器有很多典型的用途，例如用于传输能量、分配电能和耦合通信电路中的信号等。

变压器是基于互感原理工作的，互感现象发生在两个或多个相互接近的线圈之中。一个简单的变压器实际上就是两个通过互感而进行电磁感应的线圈。由于两个磁耦合线圈间彼此绝缘，能量从一个线圈到另一个线圈的传输是在完全绝缘的情况下进行的。这样一种能量传输方式有许多优点，通过学习本章，读者会对此有所认识。

本章目标

- 解释互感
- 描述变压器的结构和工作方式
- 解释升压变压器的工作方式
- 解释降压变压器的工作方式
- 论述跨接于次级绕组的负载电阻的影响
- 论述变压器反映负载的概念
- 论述变压器的阻抗匹配
- 解释作为一个分立元件的变压器的原理
- 描述一个实际的变压器
- 介绍几种典型的变压器
- 检测变压器

主要术语

- 互感(L_M)
- 变压器
- 初级绕组
- 次级绕组
- 磁耦合
- 匝数比(n)
- 电阻变换
- 阻抗匹配
- 额定视在功率
- 中心抽头(CT)

技术实践

在技术实践中，将探讨一种典型的直流电源的检测。该直流电源利用变压器耦合，从标准电源插座上获得交流电压。通过测量不同点的电压值确定是否存在故障，并且找到故障点的具体位置。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

15.1 互感

两个线圈彼此靠得很近时，一个线圈中电流所产生的交变电磁场，由于互感作用，在另一个线圈中引起感应电压。

学完这一节，读者应该能够：

- 解释互感
- 论述磁耦合
- 明确电隔离
- 明确耦合系数
- 明确影响互感的要素，并且能确定其数学描述

在第 10 章已经讨论过，线圈中通过的电流增加、减少和反向时，线圈周围分布的电磁场将随之增强、减弱和反向变化。

当第二个线圈紧靠第一个线圈放置时，第一个线圈中电流所产生的交变磁场的磁力线会切割第二个线圈，使两个线圈由于磁耦合而产生感应电压。如图 15.1 所示，当两个线圈磁耦合时，这两个线圈之间由于没有电连接而保持电隔离。此时，只有磁场与线圈相交链。如果第一个线圈中的电流是正弦波，那么在第二个线圈中产生的感应电压也将是正弦波。第一个线圈中的电流在第二个线圈中产生的感应电压的大小，取决于两线圈间的互感(L_M)。互感系数由两个线圈的自感(L_1，L_2)和两个线圈间的耦合(k)确定。最大限度的耦合，就是将两个线圈绕在同一个铁心上。

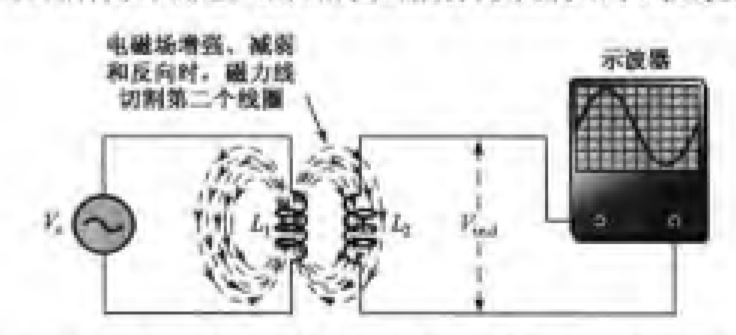


图 15.1 第一个线圈中交变电流产生交变磁场，该磁场与第二个线圈相交链，并在第二个线圈中产生感应电压

15.1.1 耦合系数

两个线圈之间的耦合系数 k，是由线圈 1 和线圈 2 相交链产生的磁通ϕ_{1-2}与线圈 1 产生的总磁通量ϕ_1 的比，如下：

$$k = \frac{\phi_{1-2}}{\phi_1} \tag{15.1}$$

例如，假若由线圈 1 所产生的磁通中有一半与线圈 2 相交链，则 $k = 0.5$。当线圈 1 中电流的变化率一定时，k 越大，意味着线圈 2 中产生的感应电压越大。k 没有单位，磁通的单位是韦伯，简记为 Wb。

耦合系数 k 的大小取决于两个线圈的接近程度、铁心材料的类型，以及铁心的结构和形状。

15.1.2 互感系数公式

影响互感系数的三个因素(k, L_1 和 L_2)如图 15.2 所示。互感系数的计算公式为：

$$L_M = k\sqrt{L_1 L_2} \tag{15.2}$$

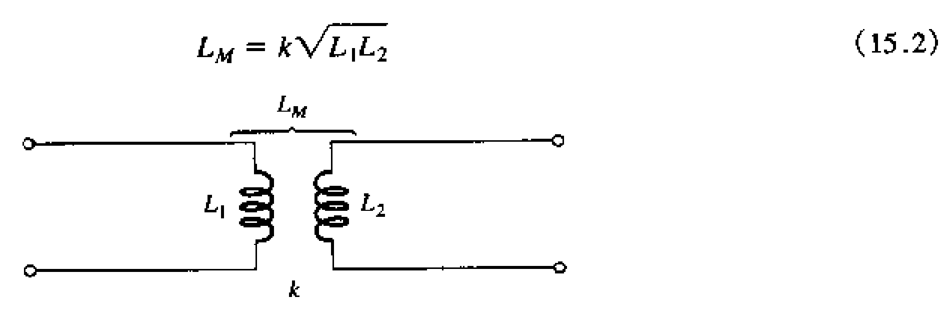


图 15.2 两个线圈的互感

例 15.1 一个线圈产生的总磁通为 50 μWb，其中有与第二个线圈相交链 20 μWb。求耦合系数 k 是多少？

解：

$$k = \frac{\phi_{1-2}}{\phi_1} = \frac{20\ \mu\text{Wb}}{50\ \mu\text{Wb}} = \mathbf{0.4}$$

练习：$\Phi_1 = 500\ \mu\text{Wb}$，$\Phi_{1-2} = 375\ \mu\text{Wb}$ 时，确定 k。

例 15.2 两个线圈绕在同一铁心上，耦合系数为 0.3。线圈 1 的电感为 10 μH，线圈 2 的电感为 15 μH，求 L_M 是多少？

解：

$$L_M = k\sqrt{L_1 L_2} = 0.3\sqrt{(10\ \mu\text{H})(15\ \mu\text{H})} = \mathbf{3.67\ \mu H}$$

练习：$k = 0.5$，$L_1 = 1$ mH，$L_2 = 600\ \mu$H 时，确定互感系数 L_M。

15.1 节练习

1. 叙述互感系数。
2. 两个 50 mH 的线圈，$k = 0.9$，L_M 为多少？
3. 如果 k 增加，一个线圈中电流变化而导致另一个线圈中产生的感应电压将会有什么变化？

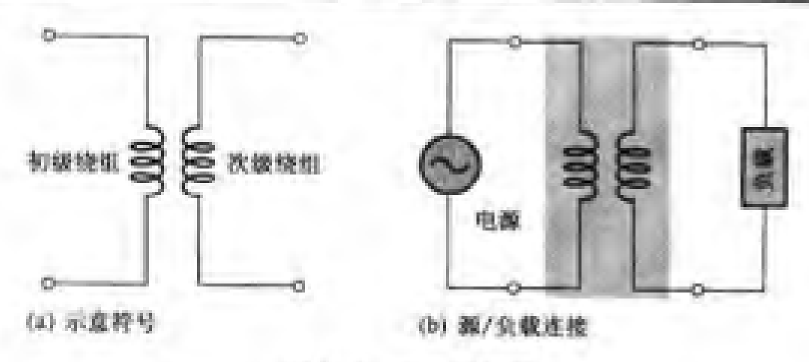
15.2 基本变压器

基本变压器是由两个彼此靠得很近，具有互感作用的线圈所构成的电子设备的模型。

学习完这一节，读者应该能够：

- 描述变压器的构成和工作原理
- 了解基本变压器的组成部分
- 论述变压器心材料的重要性
- 明确初级绕组和次级绕组
- 明确匝数比
- 论述绕组方向对电压极性的影响

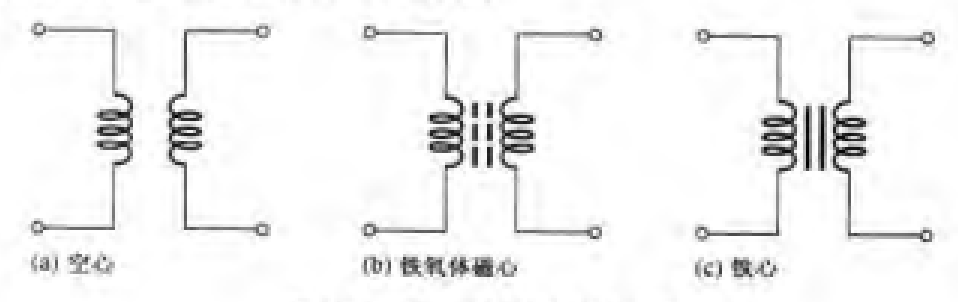
变压器的原理如图 15.3(a)所示。图中有两个线圈，一个称为初级绕组，另一个称为次级绕组。初级绕组接电源，次级绕组接负载，如图 15.3(b)所示。初级绕组是输入绕组，次级绕组是输出绕组。通常称与电压源相接的电路为初级回路，而称有感应电压的回路为次级回路。



(a) 示意符号　(b) 源/负载连接

图 15.3　基本变压器

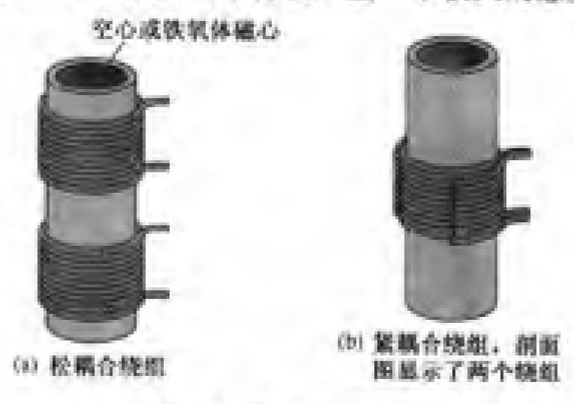
变压器的绕组通常围绕一个心绕制，这个心既可以为绕组提供一个物理架构，使线圈环绕其上，又可以使磁通更多地聚集于线圈之中。常见的变压器心材料有三种：空气、铁氧体和铁磁体。以这三种材料为心的变压器如图 15.4 所示。



(a) 空心　(b) 铁氧体磁心　(c) 铁心

图 15.4　基于不同类心的变压器

空心变压器和铁氧体磁心变压器通常用于高频电路中。这种变压器的绕组绕在一个绝缘壳上，绝缘壳中是空心，或者是铁氧体磁心，如图 15.5 所示。导线往往浸渍过绝缘漆，以防止短路。初级、次级绕组之间磁耦合的大小取决于心材料的种类以及两个绕组的相互位置。在图 15.5(a)中，由于初级、次级绕组分开绕在铁心两端，因此这两个绕组间的耦合是松耦合。在 15.5(b)图中，由于两个绕组交叠地绕在一起，因此它们之间的耦合是紧耦合。若两个绕组是紧耦合，则初级绕组中通入电流时，次级绕组中将会产生一个较大的感应电压。



(a) 松耦合绕组　(b) 紧耦合绕组，剖面图显示了两个绕组

图 15.5　圆筒状心变压器

铁心变压器通常用于音频电路和电力供应电路中。这种变压器的绕组绕在铁磁体心上，铁心由多层彼此绝缘的铁磁薄片叠合组成，如图 15.6 所示。这种铁心结构能够使磁路通畅，从而增加了两个绕组之间的耦合程度。图 15.6 显示了两种铁心变压器的主要结构。其中，图 15.61(a)所示为一种核心型结构铁心变压器，初级、次级绕组分开绕在矩形铁心两侧；图 15.61(b)所示为一种壳型结构的铁心变压器，初、次级绕组分层绕在矩形铁心的中柱上。这两种铁心都是由多

层彼此绝缘的铁磁薄片叠合组成，各有其优点。通常，核心型结构的铁心变压器绝缘性更好，有利于在高电压情况下工作；而壳型结构的铁心变压器具有较高的磁通，适用于低压变换。各种类型的变压器如图15.7所示。

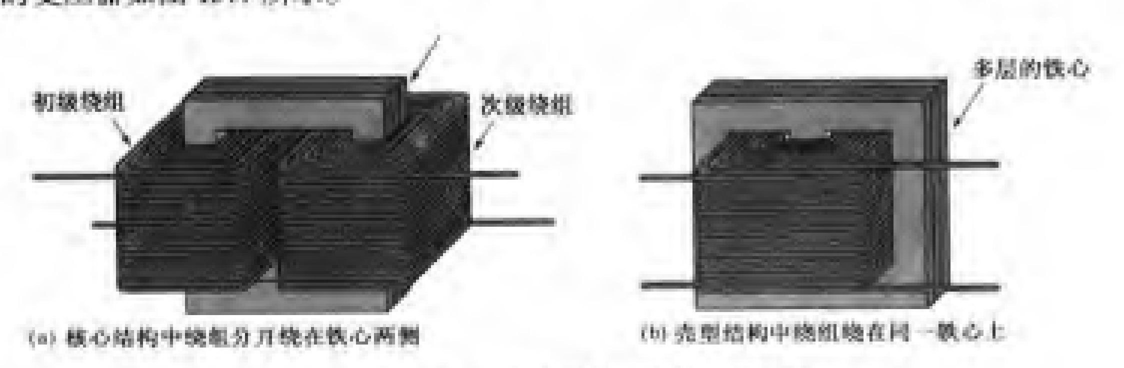


图15.6 具有多层绕组的铁心变压器

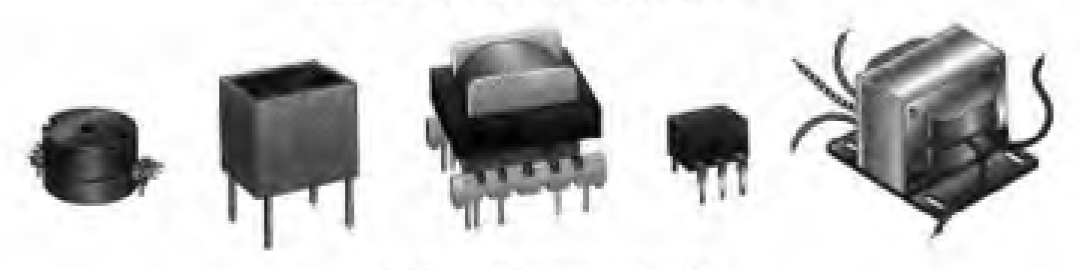


图15.7 各种常见的变压器

15.2.1 匝数比

用来表示变压器工作性能的参数是匝数比。匝数比是指变压器次级绕组匝数与初级绕组匝数之比，如下：

$$n = \frac{N_{sec}}{N_{pri}} \tag{15.3}$$

尽管本书中匝数比的定义如式(15.3)所示，许多资料也用 N_{sec}/N_{pri} 定义，但也有用 N_{pri}/N_{sec} 定义的。无论哪种定义，只要解释清楚并一直运用，就都是正确的。有些资料即使给出了变压器的说明，也很少给出匝数比的说明。一般来说，输入和输出电压比以及功率比是变压器的关键指标。而匝数比在研究变压器的工作原理方面非常有用。

例15.3 一个初级线圈为100匝，次级线圈为400匝的变压器，匝数比为多少？

解： $N_{sec} = 400$，$N_{pri} = 100$，所以匝数比为：

$$n = \frac{N_{sec}}{N_{pri}} = \frac{400}{100} = 4$$

练习： 某一变压器，匝数比为10。如果 $N_{pri} = 500$，N_{sec} 为多少？

15.2.2 绕组的绕向

变压器另一个重要的参数就是绕组的缠绕方向。如图15.8所示，绕组的绕向决定了次级绕组中感应电压相对于初级绕组中的外加电压的极性。同名端表示初级、次级绕组中电压极性的关系，如图15.9所示。

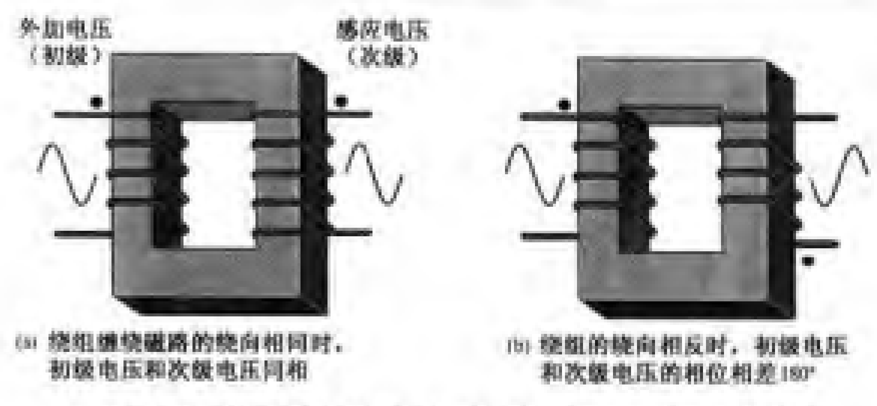


图 15.8 绕组的绕向决定了初级、次级绕组电压极性的关系

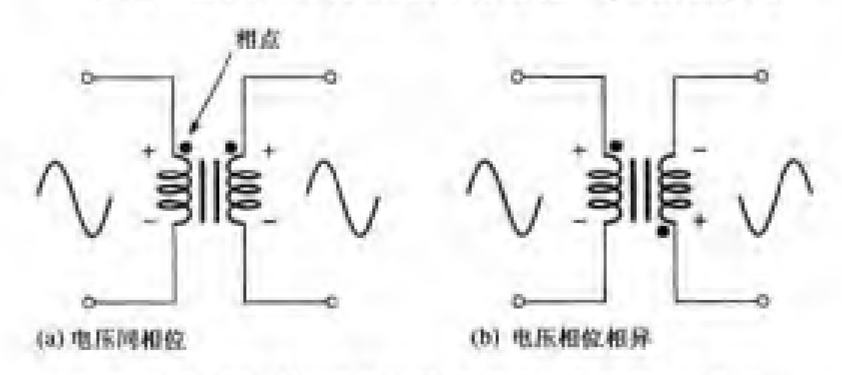


图 15.9 用同名端表示初级、次级绕组电压极性的关系

15.2 节练习

1. 变压器的基本工作原理是什么?
2. 叙述匝数比。
3. 变压器绕组绕向为什么很重要?
4. 已知某一变压器,初级绕组为 500 匝,次级绕组为 250 匝,匝数比为多少?

15.3 升压变压器

升压变压器次级绕组匝数多于初级绕组的匝数,这种变压器常用于提高交流电压。

学完这一节,读者应该能够:

- 解释升压变压器的工作原理
- 阐述初级、次级电压和匝数比的关系
- 用匝数比确定一个升压变压器

如果一个变压器的次级电压大于初级电压,那么这个变压器就叫做升压变压器。升压大小取决于匝数比。

次级电压(V_{sec})和(V_{pri})初级电压之比 N_{sec} 等于与次级绕组匝数与初级绕组匝数之比 N_{pri}。

$$\frac{V_{sec}}{V_{pri}}=\frac{N_{sec}}{N_{pri}} \tag{15.4}$$

称 N_{sec}/N_{pri} 为匝数比 n,从上式得出:

$$V_{sec}=nV_{pri} \tag{15.5}$$

式(15.5)表明，次级电压等于匝数比乘以初级电压。该式成立的条件是初级、次级绕组的耦合系数 $k=1$，而实际上，一个铁心很好的变压器的耦合系数也接近于 1。由于升压变压器次级绕组匝数 N_{sec} 总是大于初级绕组匝数 N_{pri}，所以升压变压器的匝数比总是大于 1。

例 15.4　在图 15.10 所示的变压器中，匝数比为 3，次级绕组两端的电压是多少？

解：次级电压为：

$$V_{sec} = nV_{pri} = (3)120\text{ V} = \mathbf{360\ V}$$

值得注意的是，匝数在图中表示为 1:3，意思是次级绕组每 3 匝对应初级绕组 1 匝。

练习：将图 15.10 中变压器的匝数比变为 4，确定 V_{sec}。



图 15.10

15.3 节练习

1. 升压变压器有什么用途是什么？
2. 如果匝数比为 5，次级电压比初级电压大多少？
3. 当 240 V 的交流电压加在匝数比为 10 的变压器的初级时，次级电压为多少？

15.4　降压变压器

降压变压器的初级绕组匝数多于次级绕组匝数，这种变压器常用于来降低交流电压。

学完这一节，读者应该能够：

- 解释降压变压器的工作原理
- 用匝数比确定一个降压变压器

一个次级电压低于初级电压的变压器叫做降压变压器，电压降低的程度取决于匝数比。式(15.5)对降压变压器同样适用。

由于降压变压器次级绕组的匝数总小于初级绕组的匝数，所以降压变压器的匝数比总小于 1。

例 15.5　图 15.11 所示变压器的匝数比为 0.2，次级电压是多少？

解：次级电压为：

$$V_{sec} = nV_{pri} = (0.2)120\text{ V} = \mathbf{24\ V}$$

练习：图 15.11 所示的变压器，当匝数比变为 0.48 时，确定次级电压。

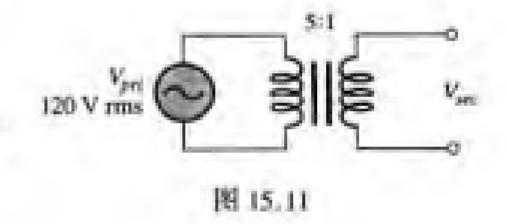


图 15.11

15.4 节练习

1. 降压变压器有什么用途？
2. 120 V 的交流电压加在匝数比为 0.5 的变压器的初级绕组上，次级电压为多少？
3. 要将初级交流电压由 120 V 降至 12 V，匝数比应为多少？

15.5　次级绕组的加载

当变压器的次级连接一个负载电阻时，次级回路中负载上的电流与初级回路电流的关系取决于匝数比。

学完这一节,读者应该能够:

- 论述跨接于次级绕组上的负载电阻的影响。
- 当升压变压器加负载后,确定次级电流。
- 当降压变压器加负载后,确定次级电流。
- 论述变压器的功率问题。

如果给变压器次级接上一个负载电阻,如图 15.12 所示,会由于线圈中产生的感应电压使次级回路中产生感应电流。可以证明,初级电流 I_{pri} 与次级电流 I_{sec} 的比等于匝数比,如下式所示:

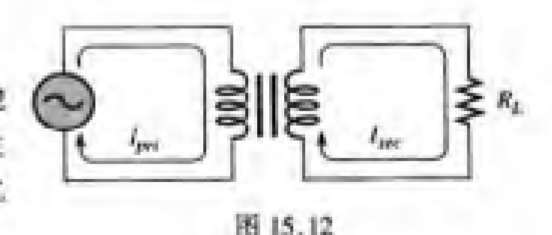


图 15.12

$$\frac{I_{pri}}{I_{sec}} = n \tag{15.6}$$

将式(15.6)加以变换,得到式(15.7),该式表明 I_{sec} 等于乘以 I_{pri} 匝数比的倒数。

$$I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right)I_{pri} \tag{15.7}$$

因此,对于匝数比 n 大于 1 I_{pri} 的升压变压器来说,次级电流小于初级电流;对于匝数比 n 小于 1 的降压变压器来说,I_{sec} 比 I_{pri} 大。

例 15.6 在图 15.13 中,两个变压器次级均接有负载。如果每个变压器的初级电流为 100 mA,那么负载电流是多少?

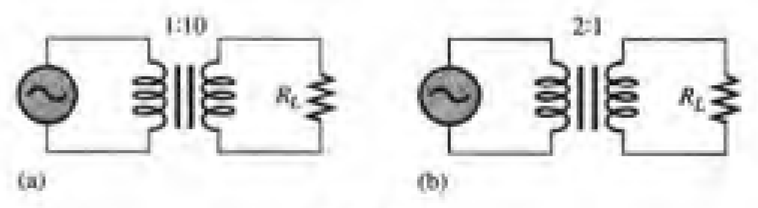


图 15.13

解: 在图 15.13(a)中,匝数比 $n = 10$。流过负载的电流为:

$$I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right)I_{pri} = (0.1)100\ \text{mA} = \mathbf{10\ mA}$$

在图 15.13(b)中,匝数比 $n = 0.5$。流过负载的电流为:

$$I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right)I_{pri} = (2)100\ \text{mA} = \mathbf{200\ mA}$$

练习: 在图 15.13(a)中,假定初级电流保持原来的数值不变。匝数比增大一倍时,次级电流将为多少?在图 15.13(b)中,匝数比减小一半时,次级电流将为多少?

15.5.1 初级功率等于负载功率

当变压器次级绕组接入一个负载后,变压器为负载提供的功率与初级绕组的功率相等。对于理想变压器,初级接收的功率等于次级传送给负载的功率。如果考虑变压器自身的损耗,那么负载所接收的功率总小于初级绕组所提供的功率。

功率的大小取决于电压和电流。变压器并不能增加功率。因此,如果电压增大,电流就要减小,反之亦然。对于一个理想的变压器,无论匝数比为多少,初级和次级的功率总是相等的,这一关系用下式来表示。电源为初级绕组提供的功率为:

$$P_{pri}=V_{pri}I_{pri}$$

传递给负载的功率为：

$$P_{sec}=V_{sec}I_{sec}$$

从式(15.7)和式(15.5)可知，

$$I_{sec}=\left(\frac{1}{n}\right)I_{pri} \quad 并且 \quad V_{sec}=nV_{pri}$$

代入负载功率，得：

$$P_{sec}=\left(\frac{1}{n}\right)nV_{pri}I_{pri}$$

消去公因子，得：

$$P_{sec}=V_{pri}I_{pri}=P_{pri}$$

变压器传递功率的效率非常高时，这个结果与实际很接近。

15.5 节练习

1. 如果变压器的匝数比为2，次级电流是大于还是小于初级电流？相差多少？
2. 一个变压器初级绕组是1000匝，次级绕组是250匝，当 $I_{pri}=0.5$ A时，I_{sec}是多少？
3. 对于第2题，当次级负载的电流为10 A时，初级电流是多大？

15.6 反映负载

从次级的角度看，跨接于变压器次级绕组两端的负载，在初级回路中相当于一个电阻。该电阻的阻值与次级所加的实际负载阻值不等。实际负载"反映"到初级回路的负载大小由匝数比决定。这个反映负载会对初级回路产生影响，并且决定了初级电流的大小。

学完这一节，读者应该能够：

- 论述变压器中反映负载的概念
- 确定反映电阻
- 解释匝数比如何影响反映电阻
- 计算反映电阻

反映负载的概念如图15.14所示。变压器工作时，次级回路所接的负载(R_L)由于变压器的作用反映到初级回路。从变压器初级所加的电源两端看，负载(R_L)在初级回路中等效为一个电阻(R_{pri})，R_{pri}的大小由匝数比和负载电阻决定。电阻(R_{pri})称为反映电阻。

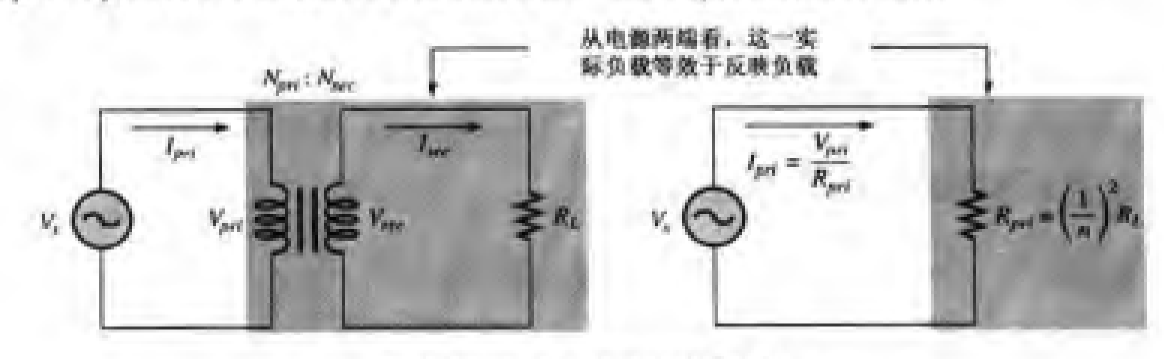


图15.14 变压器电路中的反映负载

图 15.14 中的初级电阻为 $R_{pri}=V_{pri}/I_{pri}$，这个电阻在次级为 $R_L=V_{sec}/I_{sec}$。根据式(15.4)和式(15.6)可知，$V_{sec}/V_{pri}=n$，$I_{pri}/I_{sec}=n$。运用这些关系，R_{pri} 和 R_L 的关系如下：

$$\frac{R_{pri}}{R_L}=\frac{V_{pri}/I_{pri}}{V_{sec}/I_{sec}}=\left(\frac{V_{pri}}{V_{sec}}\right)\left(\frac{I_{sec}}{I_{pri}}\right)=\left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{1}{n}\right)=\left(\frac{1}{n}\right)^2$$

求解 R_{pri}：

$$R_{pri}=\left(\frac{1}{n}\right)^2R_L \tag{15.8}$$

式(15.8)表明，实际负载反映到初级回路得到的反映电阻等于匝数比的倒数的平方乘以负载电阻。

例 15.7 在图 15.15 中，一个耦合变压器电源所接的负载电阻为 100 Ω，匝数比为 4。从电源看反映电阻是多少？

解：由式(15.8)确定反映负载：

$$R_{pri}=\left(\frac{1}{n}\right)^2R_L=\left(\frac{1}{4}\right)^2R_L=\left(\frac{1}{16}\right)100\ \Omega=\mathbf{6.25\ \Omega}$$

从电源两端看，6.25 Ω 相当于电阻接在电源两端，等效电路如图 15.16 所示。

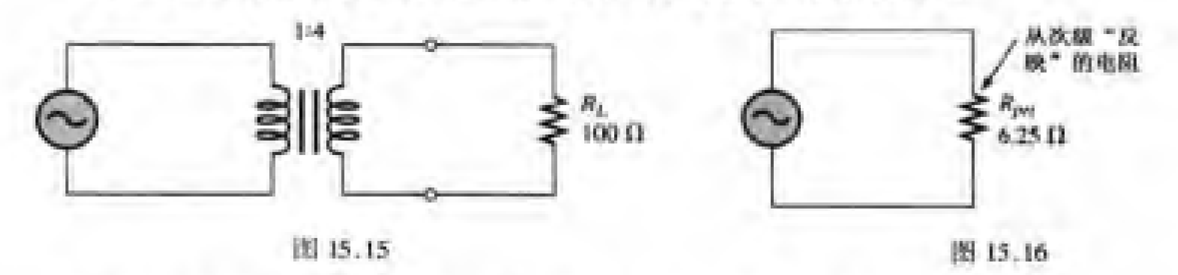


图 15.15 图 15.16

练习：如果图 15.15 中的匝数比为 10，R_L 为 600 Ω，反映电阻是多大？

例 15.8 在图 15.15 中，一个变压器的匝数比为 0.25，反映电阻是多少？

解：反映电阻为：

$$R_{pri}=\left(\frac{1}{n}\right)^2R_L=\left(\frac{1}{0.25}\right)^2100\ \Omega=(4)^2100\ \Omega=\mathbf{1600\ \Omega}$$

这一结果表明，匝数比不同时，同一负载电阻的反映电阻也不同。

练习：为了使反映电阻为 800 Ω，图 15.15 中的匝数比应为多少？

15.6 节练习

1. 给出反映电阻的定义。
2. 变压器的哪些参数决定了反映电阻？
3. 一个匝数比为 10，负载电阻为 50 Ω 的变压器，反映到初级的电阻是多少？
4. 将一个 4 W 的负载电阻反映到初级为 400 Ω 的反映电阻，变压器的匝数比是多少？

15.7 负载电阻和电源内阻的匹配

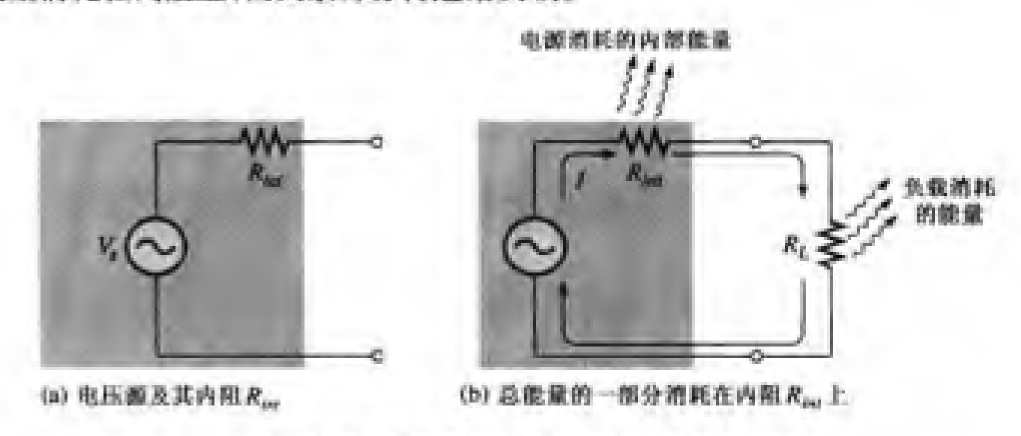
变压器的一个作用是使负载电阻与电源内阻匹配以实现最大功率传递。这一技术称为阻抗匹配。在第 8 章，我们已经学过最大功率传递定理。在音频电路中，专门的阻抗匹配变压器常用于使放大器的功率最大限度地传输到扬声器。

学完这一节，读者应该能够：

- 论述用变压器实现阻抗匹配
- 给阻抗一个概括的定义
- 明确阻抗匹配
- 解释阻抗匹配的目的
- 描述一个实际的运用

阻抗对电流起阻碍作用，由电阻和电抗组合构成。在本章的论述中，阻抗仅包含电阻。

图 15.17 所示电路表示了一个基本电路中功率传输的概念。其中，图 15.17(a)是一个用串联电阻表示其内阻的交流电压源。所有的实际电源都会由于内部的电路和物理结构的原因，而具有一些固定的内阻。将这种电源直接接入一个负载时，如图 15.17(b)所示，所构成的电路实际上起着一个将电源产生的能量转移到负载的作用。但是，在这个能量转移过程中，总有一定数量的能量消耗在内阻上，而其余部分传递给负载。



(a) 电压源及其内阻 R_{int}　　(b) 总能量的一部分消耗在内阻 R_{int} 上

图 15.17　从非理想电压源转移给负载的能量

在大多数实际电路中，电源内部各种类型电阻的阻值都是固定的。而且在很多情况下，作为负载的设备的阻值也是固定的，不能更改。如果需要将一个给定的负载与一个给定的电源相连，它们之间的电阻匹配只能靠运气。在这种情况下，一种特殊的宽带变压器可用于实现电阻匹配。即用变压器所具有的反映电阻的特性将负载电阻变换成与电源内阻相等的电阻，使电源和负载之间实现匹配。这种技术称为阻抗匹配，而这种变压器称为阻抗匹配变压器。

我们以一个常见的实例来说明阻抗匹配的概念。电视接收机典型的输入电阻是为 300 Ω。电视接收机需要用输入电缆将天线与接收机相连以接收信号。这里，天线和输入电缆相当于电源，电视接收机的输入电阻相当于负载，如图 15.18 所示。



(a) 天线和输入电缆相当于电源，电视接收机的输入电阻相当于负载　(b) 天线和电视接收机系统的等效电路

图 15.18　天线直接与电视接收机相连

通常,天线系统自身具有的阻抗为75 Ω。这意味着天线和输入电缆是一个内阻抗为75 Ω的电源。因此,如果将内阻抗为75 Ω的电源(天线和输入电缆)直接与300 Ω的电视接收机相连,电视接收机将不会获得最大功率,电视机接收的信号会很弱。解决这个问题的方法是使用一个匹配变压器,按图15.19所示的方法接入电路,使300 Ω的负载电阻与75 Ω的电源内阻相匹配。

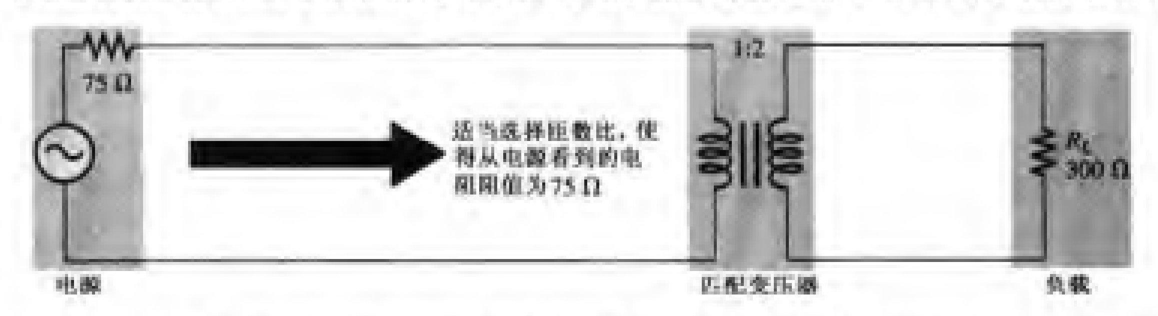


图15.19 通过变压器耦合使负载与电源相匹配以实现最大功率传递

要实现电阻匹配,也就是要使负载电阻(R_L)反映到初级回路,并且使这个反映电阻的阻值等于电源内阻(R_{in})。必须选择一个合适的匝数比(n)。如果要将300 Ω的负载变为与电源的75 Ω内阻相等,可利用式(15.8)来确定所需要的匝数比 n。若已知 R_L 和 R_{pri} 的值,则有:

$$R_{pri} = \left(\frac{1}{n}\right)^2 R_L$$

移项,等式两边同除以 R_L:

$$\left(\frac{1}{n}\right)^2 = \frac{R_{pri}}{R_L}$$

等式两边开方:

$$\frac{1}{n} = \sqrt{\frac{R_{pri}}{R_L}}$$

两边求倒数,得匝数比:

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}} \tag{15.9}$$

最后,求出匝数比:

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}} = \sqrt{\frac{300\ \Omega}{75\ \Omega}} = \sqrt{4} = 2$$

因此,用一个匝数比为2的匹配变压器就可以解决上述电阻匹配问题。

例15.9 某放大器的输出电阻为800 Ω。为了给一个8 Ω的话筒提供最大功率,匹配变压器的匝数比应为多少?

解:反映电阻应等于800 Ω。根据式(15.9),匝数比为:

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}} = \sqrt{\frac{8\ \Omega}{800\ \Omega}} = \sqrt{0.01} = 0.1$$

即每1匝次级线圈对应10匝初级线圈。电路图及其等效的反映电阻如图15.20所示。

练习:在图15.20中,若有两个话筒并联,要使其获得最大功率8 Ω,匝数比应为多少?

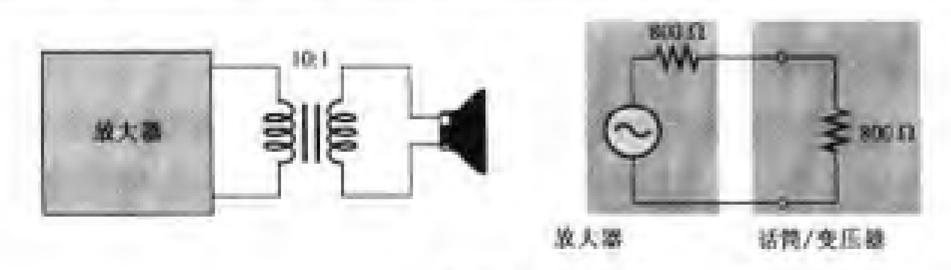


图 15.20

15.7 节练习

1. 什么是阻抗匹配?
2. 负载电阻与电源内阻相匹配的优点是什么?
3. 若变压器的匝数比为 0.5,跨接于次级绕组两端的负载的反映电阻是多少?

15.8 用于隔离的变压器

由于变压器初级、次级绕组之间没有电的连接,所以变压器常用来隔离初级和次级回路。而变压器中的能量则完全依靠磁耦合传输。

学完这一节,读者应该能够:

- 解释变压器如何起隔离作用
- 论述隔直
- 论述传输线的隔离

15.8.1 隔直

图 15.21(a)所示的电路中,如果变压器初级绕组中的电流是直流,那么这个电流不会对次级绕组产生任何影响。因为只有当初级绕组中的电流变化时,才能在次级绕组中产生感应电压,如图 15.21(b)所示。因此,变压器能够将次级回路与加直流电压的初级回路隔离开来。

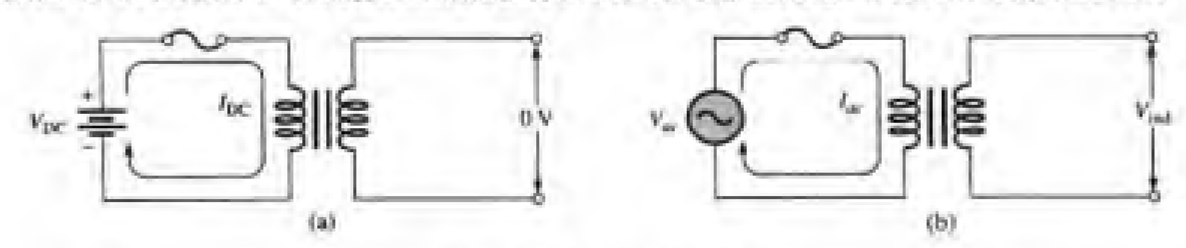


图 15.21 隔直与交流耦合

一个典型的应用是,将一个小变压器接在一个放大器的输出端,这个变压器将保持放大器输出端的直流电压不受下一级放大器的影响。只有交流信号能通过变压器从一级耦合下一级,如图 15.22 所示。

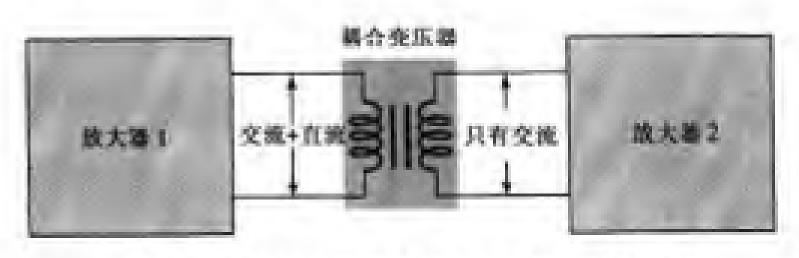


图 15.22 用变压器耦合实现放大器之间的隔直

15.8.2　输电线的隔离

变压器还常用于将电子设备从 60 Hz,110 V 的交流电力线中隔离出来。如果不慎将 110 V 的电线接在了设备的金属机壳上,可利用隔离变压器将 60 Hz 交流电与设备隔离以防止可能出现的电击危险。如果插头的插针没有区别,既可以正插又可以反插,就可能出现电击危险。顺便提一下,为了防止发生这种情况,很多插头都有带销插针,使得插头只能按一种方式插入。

图 15.23 显示金属底座不是接地而是接在 110 V 的电力线上时,如何使用变压器来防止可能出现的危险。当电路中接入一个隔离变压器时,由于变压器次级没有与电源地相连,所以次级是"浮动的"。如果一个人接触到次级电压,由于没有完整的电流通路,就会减少电击危险。这是因为电击的发生需要有电流。

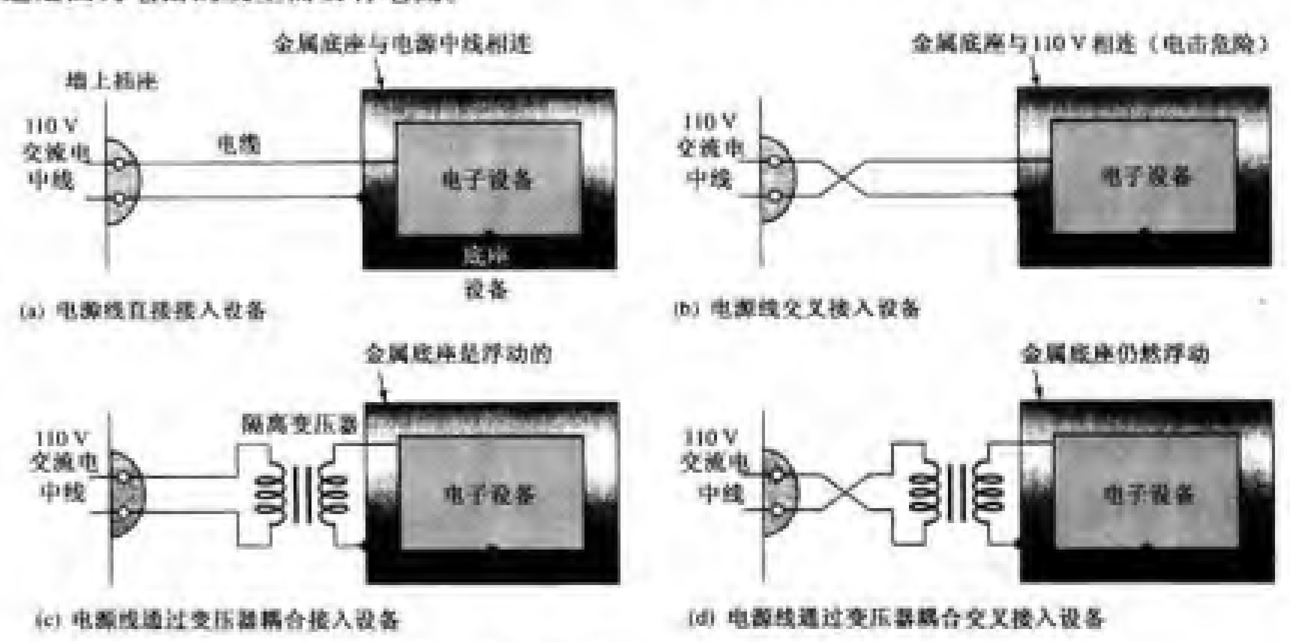


图 15.23　利用隔离变压器减少电击危险

15.8 节练习

1. 电隔离的含义是什么?
2. 用变压器能否实现直流电压耦合?

15.9　实际变压器

到目前为止,我们都是以理想化的观点来讨论变压器的工作。也就是忽略了绕线电阻、绕线间的电容以及磁心的非理想特性,并认为变压器的效率是 100%。对于研究变压器的基本原理和许多应用来说,这种理想化的模型是有效的。然而,我们也应该认识具有非理想特性的实际变压器。

学完这一节,读者应该能够:

- 描述一个实际变压器
- 列出并描述非理想特性
- 解释变压器的额定功率
- 明确变压器的效率

15.9.1 绕线电阻

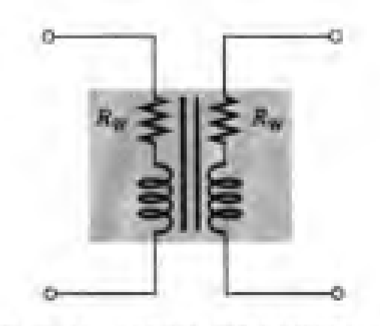


图 15.24 实际变压器的绕线电阻

实际变压器的初级和次级绕组都有电阻。在第 14 章我们已经认识了电感器的绕线电阻。实际变压器的绕线电阻可表示为一个与绕组串联的电阻，如图 15.24 所示。

实际变压器绕线电阻的存在，减小了跨接于次级绕组两端的负载上的电压。负载上电压的减少是由于绕线电阻从初级电压和次级电压中减去了一部分电压，从而使初级电压和次级电压比用 $V_{sec}=nV_{pri}$ 计算的低。在许多情况下，这种分压数值很小，往往被忽略。

15.9.2 铁心损耗

通常，在实际变压器的铁心中会发生能量转换。这种能量转换仅出现在以铁氧体和铁磁体材料为心的变压器中，空心变压器不会出现这种转换，而能量转换的结果使铁心发热。能量转换的一部分是由于初级电流方向不断改变导致其产生的磁场不断翻转引起的，这部分能量转换称为磁滞损耗；能量转换的另一部分是由涡流引起的。当铁心中的磁通发生变化时，根据法拉第电磁感应定律，铁心中会产生感应电压。由于铁心是导体，在感应电压的作用下，铁心中会产生电流，称为涡流。涡流遇到铁心的电阻，电阻消耗功率，使铁心发热。使用磁铁薄片叠合而成的铁心可以使这种能量转换大大减少。因为这些磁铁薄片之间彼此绝缘，使得限制在一个很小范围内的涡流的积聚减至最小，从而使铁心损耗减至最小。

15.9.3 磁通泄漏

在理想变压器中，假定由初级电流产生的全部磁通均通过铁心穿过次级绕组，反之亦然。而在实际变压器中，会有一部分磁力线冲破磁心进入周围的空气中，再形成闭合回路。图 15.25 显示了初级电流产生的磁场。磁通泄漏会使次级电压减少。

实际穿过次级绕组的磁通的多少决定了变压器的耦合系数。例如，9/10 的磁通留在铁心内，耦合系数就是 0.90 或 90%。大多数的铁磁体心变压器都有很高的耦合系数(大于 0.99)，而铁氧体心和空心变压器的耦合系数要低一些。

15.9.4 线圈电容

在第 14 章介绍过，邻近的线圈之间总会存在一些分布电容。这些分布电容可用与变压器的每一个绕组并联的等效电容表示，如图 15.26 所示。

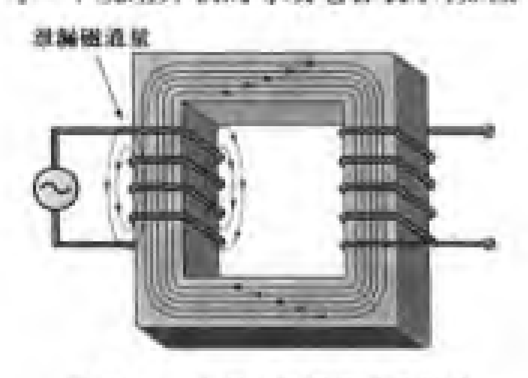


图 15.25 实际变压器的磁通泄漏

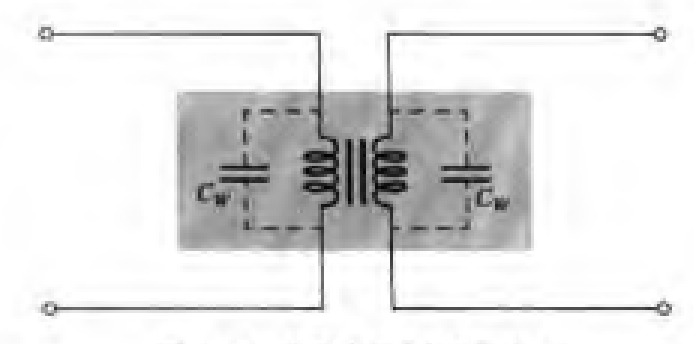


图 15.26 实际变压器的线圈电容

变压器工作于低频时,由于电抗很大,这些分布电容的影响很小。而当变压器工作于高频时,电抗减小并开始在初级绕组两端和次级负载两端产生旁路效应。旁路效应造成只有少部分的初级电流流过初级绕组,以及少部分的次级电流流过负载。随着频率的升高,旁路效应会减小负载上的电压。

15.9.5 变压器的额定功率

电源变压器典型的额定值是功率、初级/次级电压和工作频率。例如,一个给定变压器的额定值为2 kVA,500/50,60 Hz。其中,2 kVA 表示额定视在功率,500 和 50 是初级和次级电压,60 Hz 是工作频率。

变压器的额定值有助于我们对一个实际运用选择合适的变压器。例如,假设次级电压为 50 V。这种情况下,负载电流为:

$$I_L = \frac{P_{sec}}{V_{sec}} = \frac{2\text{ kVA}}{50\text{ V}} = 40\text{ A}$$

如果次级电压为 500 V,则负载电流为:

$$I_L = \frac{P_{sec}}{V_{sec}} = \frac{2\text{ kVA}}{500\text{ V}} = 4\text{ A}$$

这两个电流值是上述两种情况中次级回路所能获得的最大电流。

额定功率之所以用伏安(视在功率)表示而不用瓦特表示,是由于如果变压器负载是纯电容或纯电感,那么负载所获得的实际功率为零。但是,对于 $V_{sec} = 500\text{ V}$, $X_C = 100\ \Omega$, 60 Hz,假设电流为 5 A。则这个电流值超过了 2 kVA 次级绕组所能承受的最大值,变压器很可能被烧毁。所以用瓦特表示功率没有意义。

15.9.6 变压器效率

我们已经知道,在理想变压器中,初级绕组从电源获得的功率全部传递给了负载。由于变压器非理想特性的存在,使功率在传递过程中有损耗,即次级绕组(输出)的功率总是小于初级绕组(输入)的功率。变压器的效率(η)就是用于表示输入功率转化为输出功率的百分比。

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)100\% \tag{15.10}$$

大多数电源变压器的效率都超过 95%。

例 15.10 某种变压器的初级电流为 5 A,初级电压为 4800 V;次级电流为 90 A,次级电压为 240 V,求该变压器的效率?

解:输入功率为:

$$P_{in} = V_{pri}I_{pri} = (4800\text{ V})(5\text{ A}) = 24\text{ kVA}$$

输出功率为:

$$P_{out} = V_{sec}I_{sec} = (240\text{ V})(90\text{ A}) = 21.6\text{ kVA}$$

效率为:

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)100\% = \left(\frac{21.6\text{ kVA}}{24\text{ kVA}}\right)100\% = \mathbf{90\%}$$

练习:若某变压器的初级电流为 8 A,初级电压为 440 V;次级电流为 30 A,次级电压为 100 V,则该变压器的效率是多少?

15.9 节练习

1. 解释实际变压器与理想变压器的区别。
2. 某变压器的耦合系数是0.85的含义是什么?
3. 某变压器的额定值是10 kVA。若其次级电压是250 V,那么负载电流能达到多少?

15.10 其他类型的变压器

基本变压器有几种重要的变体,包括抽头变压器、多绕组变压器和自耦变压器。

学完本节后,读者应该能够:

- 描述几种典型的变压器
- 描述中心抽头变压器
- 描述多绕组变压器
- 描述自耦变压器

15.10.1 抽头变压器

图15.27(a)显示了一个次级绕组上具有中心抽头的变压器。中心抽头(CT,center tap)将次级绕组分成两个绕组,这两个绕组上的电压相等且等于总电压的一半。

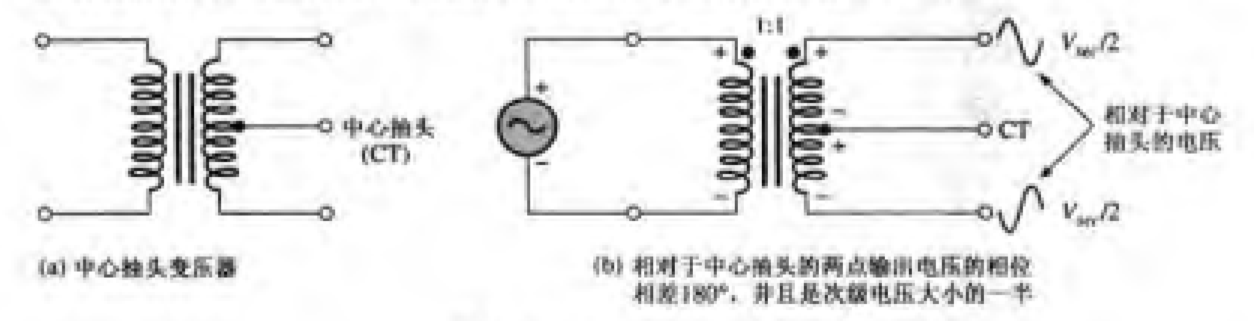


图15.27 中心抽头变压器的工作原理

在任一时刻,次级绕组两端与中心抽头之间的电压在数值上相等,但极性相反,如图15.27(b)所示。例如,在正弦电压的任一时刻,次级绕组两端的电压极性如图所示(上端+,下端-)。在中心抽头处电压的绝对值比次级绕组的上端电压小,但比其下端电压大。因此,以中心抽头为基准进行测量,次级绕组上端电位为正,而下端电位为负。中心抽头的这个特征常用于电源整流器,整流器可将交流电压变为直流电压,如图15.28所示。

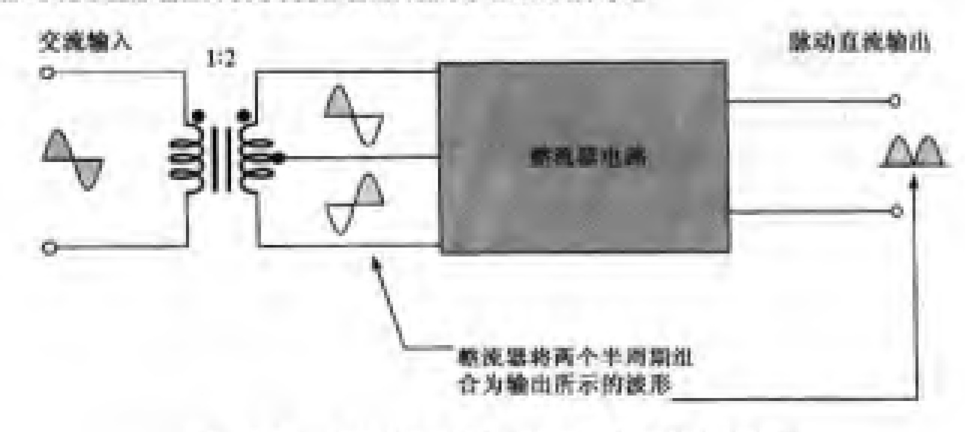


图15.28 中心抽头变压器交流-直流转换的应用

一些抽头变压器的抽头除了可以在次级绕组的电中心位置外，还可以在其他位置。同时，单个与多个初级和次级抽头往往有特定的用途。例如，阻抗匹配变压器通常在初级有一个中心抽头。各种抽头的变压器如图 15.29 所示。

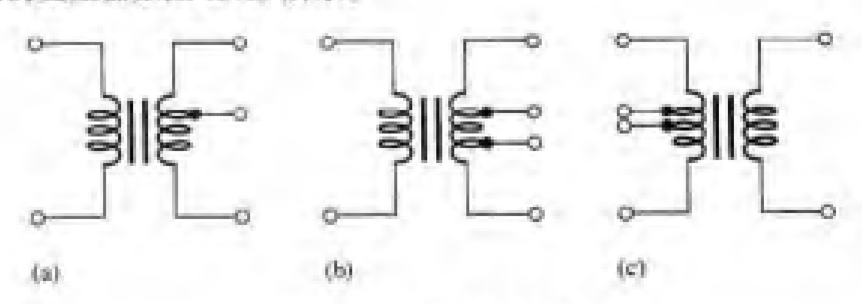


图 15.29 各种抽头变压器

一种在初级绕组上有多个抽头，在次级绕组上有一个中心抽头的变压器示例之一是电力架插式变压器。电力公司用这种变压器将动力高压电降低到居民和商业消费者使用的 110 V/220 V 民用电，如图 15.30 所示。初级绕组上的多个抽头可对匝数比进行细小调节，以克服线电压稍高或稍低的变化。

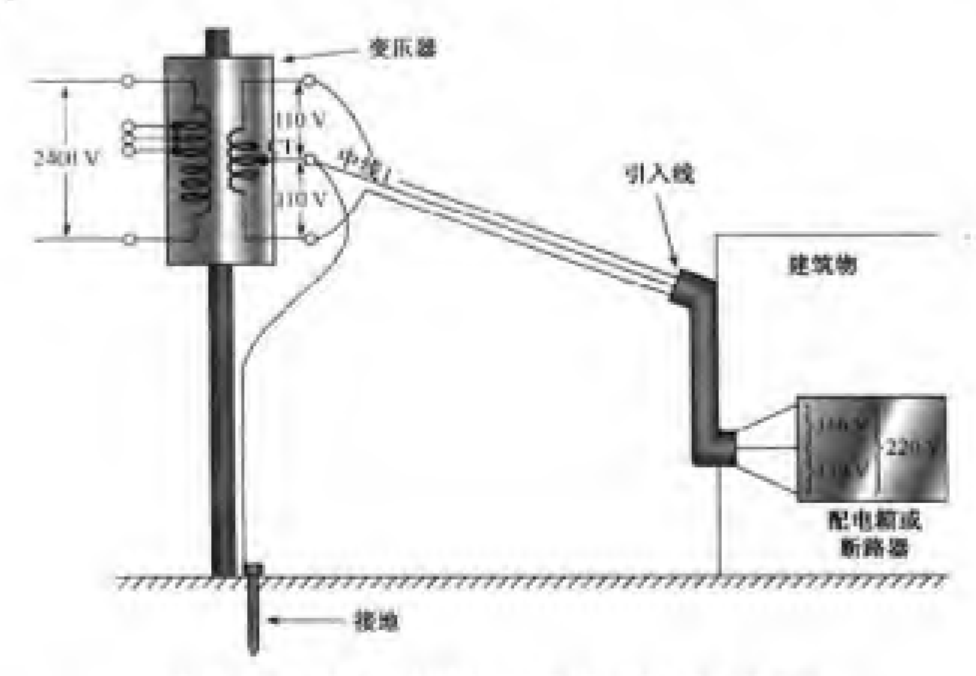


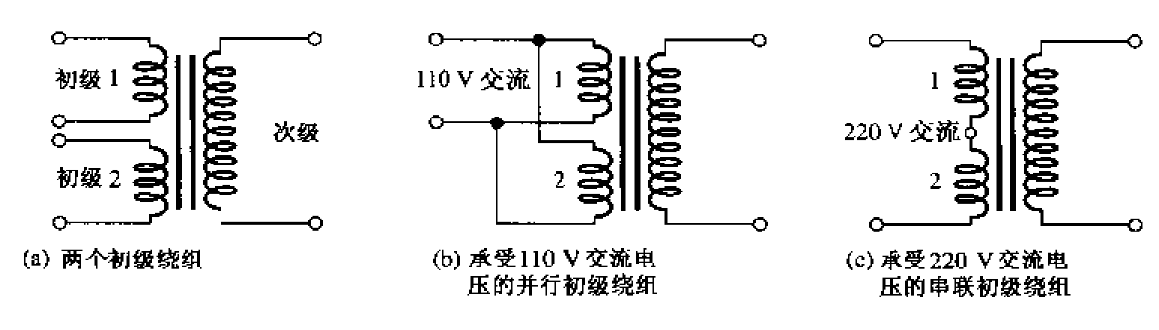
图 15.30 一个典型的电力配电系统中的架插式变压器

15.10.2 多绕组变压器

一些变压器设计成既可以将 110 V 交流电压变压，又可以将 220 V 交流电压变压。这些变压器通常有两个初级绕组，每个绕组均可承受 110 V 交流电压。当这两个绕组串联时，变压器可对 220 V 交流变压，如图 15.31 所示。

一个变压器心上可缠绕多个次级绕组。具有多个次级绕组的变压器，可以对初级绕组的电压升压或降压，以得到不同的电压输出。通常，这种变压器用于电力系统，为需要不同电压的电子设备提供适用的电压。

一个典型的有多个次级绕组的变压器如图 15.32 所示，这个变压器有三个次级绕组。有时可看到由多个初级绕组、多个次级绕组以及抽头结合在一起的变压器系统。



(a) 两个初级绕组　(b) 承受110 V交流电压的并行初级绕组　(c) 承受220 V交流电压的串联初级绕组

图 15.31　多个初级的变压器

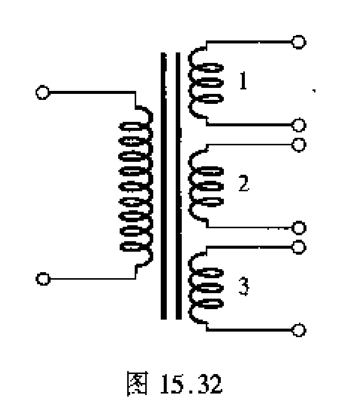


图 15.32

例 15.11　变压器各绕组的匝数如图 15.33 所示。其中一个次级绕组有中心抽头。如果初级绕组接 220 V 交流电压，求每个次级绕组的电压和以中心抽头为基准的中间次级绕组的电压。

解：

$$V_{AB} = n_{AB}V_{pri} = (0.05)120\ \text{V} = \mathbf{6\ V}$$

$$V_{CD} = n_{CD}V_{pri} = (2)120\ \text{V} = \mathbf{240\ V}$$

$$V_{(CT)C} = V_{(CT)D} = \frac{240\ \text{V}}{2} = \mathbf{120\ V}$$

$$V_{EF} = n_{EF}V_{pri} = (0.1)120\ \text{V} = \mathbf{12\ V}$$

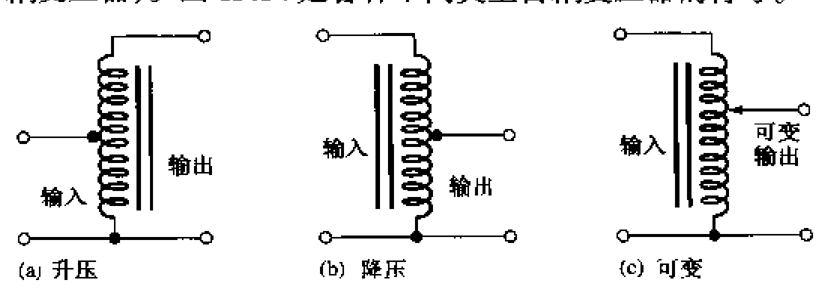
练习：如果初级绕组的匝数改为 50 匝，重复上述计算。

图 15.33

15.10.3　自耦变压器

在自耦变压器中，只有一个既可用于初级又可用于次级的绕组。在这个绕组的某一点上引出一个抽头，通过调节该抽头所在的位置，可以获得所需要的匝数比，使电压升高或降低。

自耦变压器与双线圈变压器的区别在于，前者的初级与次级之间没有电隔离。因为其初级和次级共用一个绕组。通常，自耦变压器比等效的双线圈变压器体积小、重量轻，因为对于给定的负载它需要较低的额定功率。许多自耦变压器都有一个可供调节的抽头，以便于改变输出电压（通常称之为自耦变压器）。图 15.34 是各种不同类型自耦变压器的符号。



(a) 升压　(b) 降压　(c) 可变

图 15.34　各种自耦变压器

例 15.12 说明了为什么一个自耦变压器初级、次级绕组上的功率小于其输入或输出功率。

例 15.12 某自耦变压器通过 8 Ω 的负载电阻将 220 V 的源电压转换成 160 V 的负载电压。求用千伏安表示的输入、输出功率，并说明实际需要的功率小于这个功率。假设这个变压器是理想变压器。

解：各支路电压和电流如图 15.35 所示。

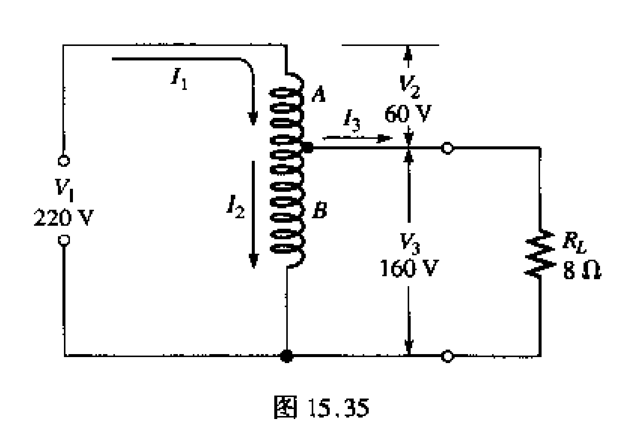


图 15.35

负载电流 I_3 由下式决定：

$$I_3 = \frac{V_3}{R_L} = \frac{160\ \text{V}}{8\ \Omega} = 20\ \text{A}$$

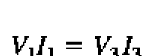
输入功率等于总源电压(V_1)乘以电源的总电流(I_1)：

$$P_{in} = V_1 I_1$$

输出功率等于负载电压 V_3 乘以负载电流 I_3：

$$P_{out} = V_3 I_3$$

对于理想变压器，$P_{in} = P_{out}$，因此：



$$V_1 I_1 = V_3 I_3$$

求 I_1：

$$I_1 = \frac{V_3 I_3}{V_1} = \frac{(160\ \text{V})(20\ \text{A})}{220\ \text{V}} = 14.55\ \text{A}$$

根据基尔霍夫电流定律，在抽头节点处：

$$I_1 = I_2 + I_3$$

求经过绕组 B 的电流 I_2：

$$I_2 = I_1 - I_3 = 14.55\ \text{A} - 20\ \text{A} = -5.45\ \text{A}$$

因为电流方向是反复变化的，负号可以去掉。

输入和输出功率为：

$$P_{in} = P_{out} = V_3 I_3 = (160\ \text{V})(20\ \text{A}) = \mathbf{3.2\ kVA}$$

绕组 A 上的功率为：

$$P_A = V_2 I_1 = (60\ \text{V})(14.55\ \text{A}) = 873\ \text{VA} = 0.873\ \text{kVA}$$

绕组 B 上的功率为：

$$P_B = V_3 I_2 = (160\ \text{V})(5.45\ \text{A}) = 872\ \text{VA} = 0.872\ \text{kVA}$$

因此，每个绕组上所需要的额定功率小于传输到负载上的功率。绕组 A 和绕组 B 在功率计算上的微小差别是由于取整数造成的。

练习：如果负载变成 4 Ω，每个绕组上所需要的额定功率会有什么不同？

15.10 节练习

1. 某变压器有两个次级绕组。初级绕组对一个次级绕组的匝数比为 10，对另一个次级绕组的匝数比为 0.2。若初级绕组所接交流电压为 240 V，求两个次级绕组的电压。
2. 指出自耦变压器相对于一般变压器的一个优点和一个缺点。

15.11 故障检修

只要工作在所规定的技术指标范围内，变压器就是一种非常简单而又可靠的设备。变压器的常见故障在于初级绕组或次级绕组开路。出现这种故障的一个原因是，变压器的运行条件超

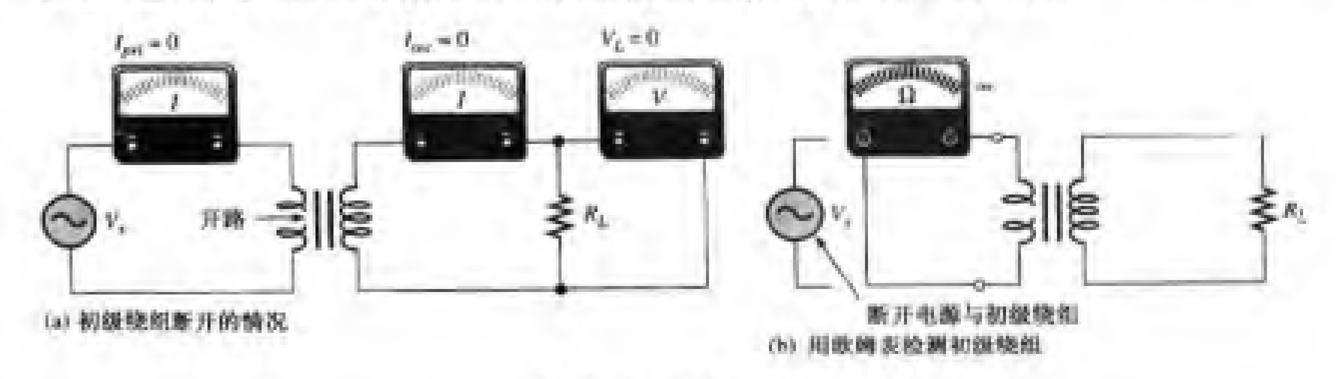
出了额定值允许的范围。通常一个变压器损坏后是很难修复的。因此,最简单而常用的做法是将其换掉。本节将讨论一些变压器的故障及其现象。

学完本节后,读者应该能够:

- 检修变压器
- 找出断路的初级绕组或次级绕组
- 找出短路或部分短路的初级绕组或次级绕组

15.11.1 初级绕组开路

当初级绕组出现开路时,初级回路中将没有电流,因此,在次级绕组中也不会有感应电压或电流。这种状况如图 15.36(a)所示,用欧姆表检测的方法如图 15.36(b)所示。



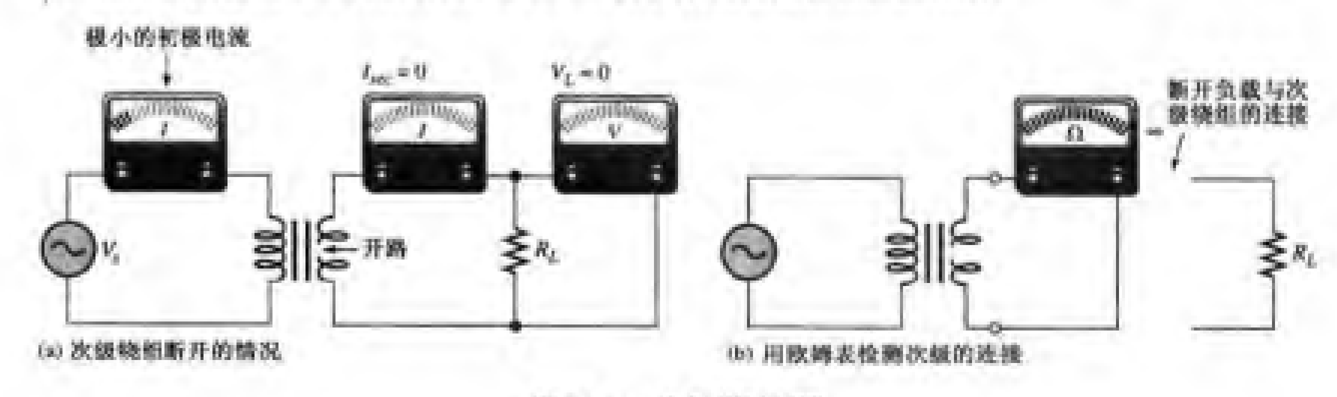
(a) 初级绕组断开的情况

(b) 用欧姆表检测初级绕组

图 15.36 初级绕组开路

15.11.2 次级绕组开路

当次级绕组出现开路时,次级回路中将没有电流,结果使负载两端没有电压。而且次级绕组断路导致初级回路电流很小(仅仅有一点磁化电流)。实际上,这时的初级电流可能几乎为零。这种状况如图 15.37(a)所示,图 15.37(b)表示用欧姆表检测的方法。



(a) 次级绕组断开的情况

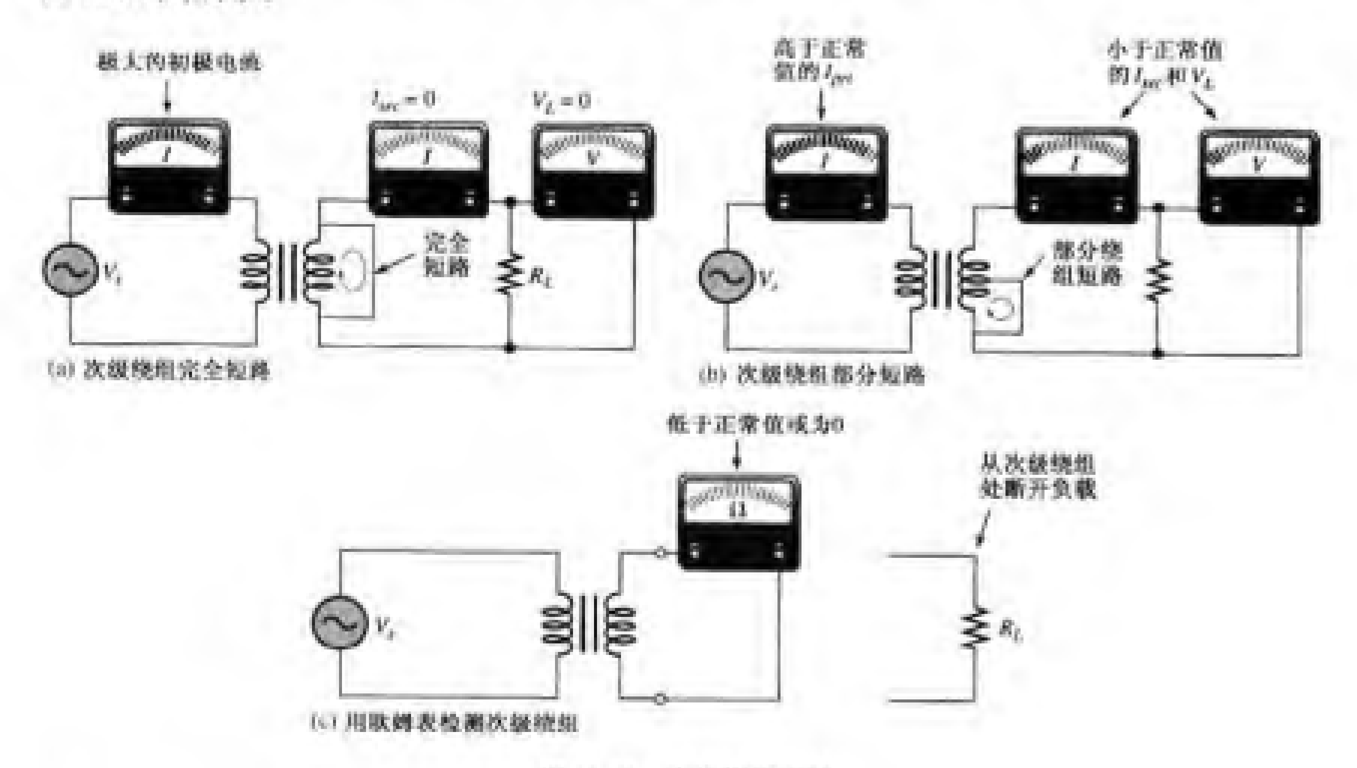
(b) 用欧姆表检测次级的连接

图 15.37 次级绕组开路

15.11.3 绕组短路或其部分短路

绕组短路的情况很少发生,而一旦发生这种情况又很难发现。初级绕组完全短路将引发极大的源电流,除非电路中装有断路器或保险丝,否则电源、变压器或二者将被烧毁。初级绕组的局部短路也会引起高于正常值的大电流。

假若次级绕组短路或其局部短路，初级电流将会大大增加，因为短路使反映阻抗变小。通常，过大的电流会烧坏初级绕组造成开路。次级绕组的短路电流也会使负载电流为零(完全短路)或小于正常值(部分短路)，如图 15.38(a)和图 15.38(b)所示。用欧姆表检测这种情况如图 15.38(c)所示。



(a) 次级绕组完全短路

(b) 次级绕组部分短路

(c) 用欧姆表检测次级绕组

图 15.38 次级绕组短路

15.11 节练习

1. 说出两种可能的变压器故障，并详述可能性最大的一个。
2. 变压器出现故障的一般原因是什么？

技术实践

变压器的基本应用是产生直流电源。变压器常用来将交流线电压耦合到电源电路系统中，该系统最终将交流电压转化为直流电压。这里的任务是检查 4 个完全相同的变压器耦合直流电源，根据一系列测量，指出当中每一个可能存在的错误。

在图 15.39 所示的电源系统中，变压器 T_1 将有效值为 110 V 的交流电压转变为另一个电压，该电压经过桥式整流、滤波、稳压以后变为 6 V 的直流电压。其中，整流器将交流电压变为全波直流电压，滤波电容 C_1 平滑了该电压。稳压器是一个能够滤波的综合环路，在负载及线电压发生变化时，能够提供稳定的 6 V 直流电压。电容 C_2 做进一步的滤波。有关这些内容的详细情况将在后续章节中介绍。图 15.39 中带圆圈的数字与电源系统中的测量点一致。

电源

有 4 个完全相同的电源系统需要进行检修，如图 15.40 所示。在电源到变压器 T_1 初级绕组的线路中装有保险丝，T_1 的次级绕组连接到包含有整流器、滤波器和稳压器的电路板上，各测量点由带圆圈的数字表示。

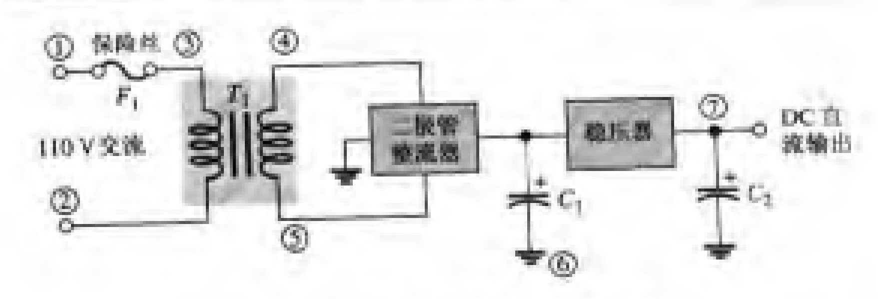


图 15.39 基本变压器耦合直流电源

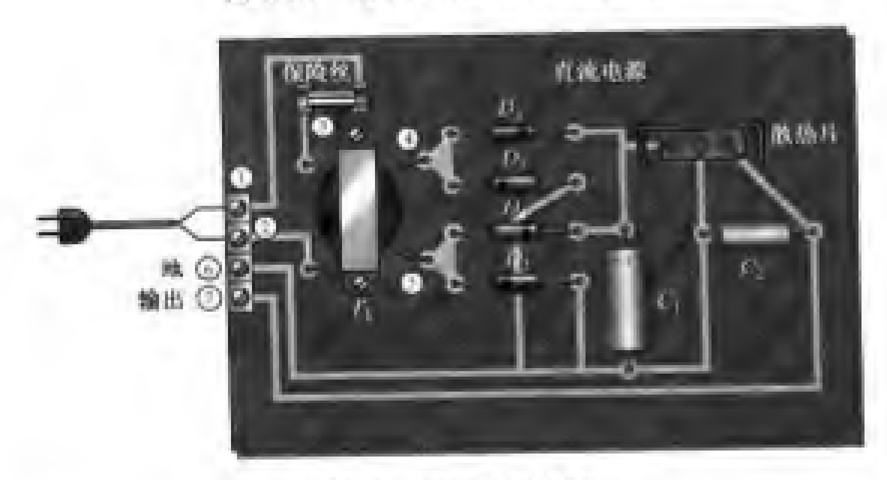


图 15.40 电源系统(俯视)

测量电源系统 1 中的电压

将电源接到标准电源插座后,用便携式万用表测量电压。在自动换挡仪表中,自动选择恰当的量程,以代替标准万用表中的人工选挡。

- 根据图 15.41 所示的读数,确定该系统是否工作正常。如果不正常,问题归结到以下几个方面中的一个:包括整流器、滤波器和稳压器的电路板、变压器、保险丝或者电源。万用表的接入点附近带圆圈的数字与图 15.40 中电源系统所标的数字是一致的。



图 15.41 电源系统 1 中的电压测量

测量电源系统 2,3,4 中的电压

- 根据图 15.42 所示的读数确定 2,3,4 系统是否工作正常。如果不正常,问题归结到以下几个方面中的一个:包括整流器、滤波器和稳压器的电路板、变压器、保险丝或者电源。图中仅表示万用表的读数和测量点。

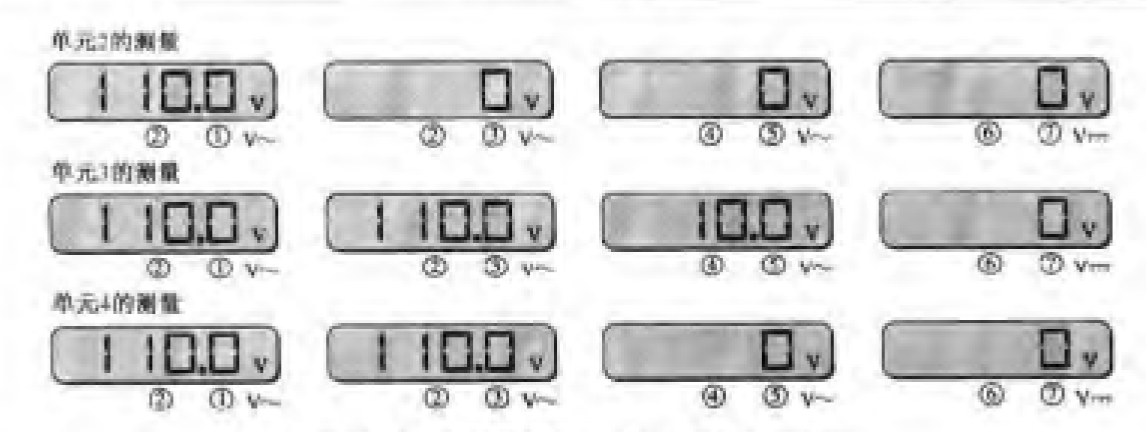


图 15.42 电源系统单元 2,3,4 中的电压测量

技术实践练习

1. 如果变压器发生故障,能否确定故障类型(短路或断路)?
2. 哪些类型的故障会导致保险丝熔断?

小结

- 一般变压器包括两个或更多个缠绕在同一个铁心上的线圈。
- 在两个磁耦合线圈之间存在互感。
- 当一个线圈中的电流改变时,另一个线圈中产生感应电压。
- 绕组与电源相连的是初级,绕组与负载相连的是次级。
- 初级绕组匝数和次级绕组匝数决定匝数比。
- 初级绕组中电压的极性与次级绕组中电压极性的关系由线圈的缠绕方向决定。
- 升压变压器匝数比大于 1。
- 降压变压器匝数比小于 1。
- 变压器不能增加功率。
- 在理想变压器中,从电源获得的功率(输入功率)等于传送给负载的功率(输出功率)。
- 如果电压升高则电流降低,反之亦然。
- 跨接于变压器次级绕组两端的负载,反映到初级回路后得到反映负载,这个反映负载的大小取决于匝数比倒数的平方。
- 通过选择适当的匝数比,变压器能使负载电阻与电源内阻相匹配,以实现对负载电阻的最大功率传送。
- 典型变压器对直流电无感应。
- 实际变压器中,电能转化为热能是由线圈电阻、铁心的磁滞损耗、涡流和磁通泄漏造成的。

主要术语

额定视在功率:用伏安表示变压器额定功率的方法。

中心抽头:在变压器线圈中点的引出线。

阻抗匹配:使负载电阻与电源内阻匹配,以获得最大功率传输的一种技术。

磁耦合:两个线圈间的磁性吸引,结果使一个线圈中变化的磁力线切割另一个线圈。

互感(L_M):两个分立线圈之间的感应,如变压器。

初级绕组:变压器的输入线圈,也叫初级。

反映电阻:次级回路中的电阻折算到初级回路中所得的电阻。

次级绕组:变压器的输出绕组,也叫次级。

变压器:由两个或更多个相互磁耦合的线圈形成的装置,并能使功率从一个线圈传输到另一个线圈。

匝数比(n):次级绕组匝数与初级绕组匝数的比值。

公式

15.1 $k = \dfrac{\phi_{1-2}}{\phi_1}$ 耦合系数

15.2 $L_M = k\sqrt{L_1L_2}$ 互感

15.3 $n = \dfrac{N_{sec}}{N_{pri}}$ 匝数比

15.4 $\dfrac{V_{sec}}{V_{pri}} = \dfrac{N_{sec}}{N_{pri}}$ 电压比

15.5 $V_{sec} = nV_{pri}$ 次级电压

15.6 $\dfrac{I_{pri}}{I_{sec}} = n$ 电流比

15.7 $I_{sec} = \left(\dfrac{1}{n}\right)I_{pri}$ 次级电流

15.8 $R_{pri} = \left(\dfrac{1}{n}\right)^2 R_L$ 反映电阻

15.9 $n = \sqrt{\dfrac{R_L}{R_{pri}}}$ 阻抗匹配的匝数比

15.10 $\eta = \left(\dfrac{P_{out}}{P_{in}}\right)100\%$ 变压器效率

自测题

1. 变压器使用:
   (a) 直流电压 (b) 交流电压 (c) 两者皆可
2. 下面哪项受变压器匝数比的影响?
   (a) 初级电压 (b) 直流电压 (c) 次级电压 (d) 以上皆不是
3. 若变压器线圈的匝数比为 1,在铁心上的缠绕方向相反,次级电压为:
   (a) 与初级电压一致 (b) 小于初级电压 (c) 大于初级电压 (d) 与初级电压不一致
4. 变压器匝数比为 10,初级交流电压为 6 V,次级电压为:
   (a) 60 V (b) 0.6 V (c) 6 V (d) 36 V
5. 变压器匝数比为 0.5,初级交流电压为 100 V,次级电压为:
   (a) 200 V (b) 50 V (c) 10 V (d) 100 V
6. 某变压器的初级绕组为 500 匝,次级绕组为 2500 匝,则匝数比为:
   (a) 0.2 (b) 2.5 (c) 5 (d) 0.5
7. 变压器初级绕组功率为 10 W,匝数比为 5,则传输到次级负载的功率为:
   (a) 50 W (b) 0.5 W (c) 0 W (d) 10 W
8. 某给定负载的变压器,次级电压是初级电压的 1/3。次级电流为:
   (a) 初级电流的 1/3 (b) 初级电流的 3 倍
   (c) 等于初级电流 (d) 小于初级电流
9. 若变压器次级绕组两端跨接的负载电阻为 1.0 kΩ,匝数比为 2,则初级回路中的反映负载为:
   (a) 250 Ω (b) 2 kΩ (c) 4 kΩ (d) 1.0 kΩ

10. 第 9 题中,如果匝数比为 0.5,反映负载为:
(a) 1.0 kΩ (b) 2 kΩ (c) 4 kΩ (d) 500 kΩ
11. 使 200 Ω 负载电阻与 50 Ω 的电源内阻相匹配的匝数比为:
(a) 0.25 (b) 0.5 (c) 4 (d) 2
12. 在变压器耦合回路中,从电源到负载实现最大功率传输的条件为:
(a) $R_L > R_{int}$ (b) $R_L < R_{int}$ (c) $(1/n)^2 R_L = R_{int}$ (d) $R_L = nR_{int}$
13. 若 12 V 电池电压加到变压器初级绕组两端,匝数比为 4,则次级电压为:
(a) 0 V (b) 12 V (c) 48 V (d) 3 V
14. 某变压器匝数比为 1,耦合系数为 0.95。若初级加 1 V 交流电压,则次级电压为 :
(a) 1 V (b) 1.95 V (c) 0.95 V

故障检修测验

参见图 15.44

1. 如果保险丝熔断,R_L 两端的电压将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
2. 如果匝数比变为 2,通过 R_L 的电流将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
3. 若电源电压的频率变高,R_L 两端的电压将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变

参见图 15.48

4. 若电源电压升高,话筒的音量将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
5. 若匝数比增加,话筒的音量将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变

参见图 15.49

6. 初级电压的有效值为 10 V。若左边的开关从 1 位拨到 2 位,上端到地的电压将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
7. 同样,初级电压的有效值为 10 V。两个开关如图中所示,如果 R_1 断开,则两端的电压将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变

参见图 15.50(c)

8. 若交流电源短路,R_L 两端的电压将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
9. 若直流电源短路,R_L 两端的电压将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
10. 若 R_L 开路,则两端电压将:
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变

习题(标有 * 的习题难度较大,奇数号题目的答案在本书最后)

15.1 节 互感

1. 当 $k = 0.75$, $L_1 = 1\ \mu$H 且 $L_2 = 4\ \mu$H 时,互感系数为多少?
2. 当 $L_M = 1\ \mu$H, $L_1 = 8\ \mu$H, $L_2 = 2\ \mu$H 时,求耦合系数?

15.2 节 基本变压器

3. 变压器初级绕组为 250 匝，次级绕组为 1000 匝，则匝数比为多少？如果初级绕组为 400 匝，次级绕组为 100 匝，则匝数比为多少？
4. 变压器初级绕组为 250 匝，为使电压加倍，次级绕组应为多少匝？
5. 对图 15.43 中的每一个变压器，表示出次级电压与初级电压的关系，并求出电压的幅度。

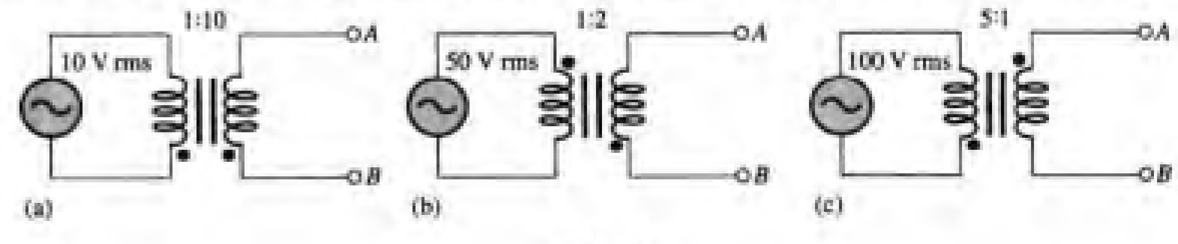


图 15.43

15.3 节 升压变压器

6. 要将 240 V 交流电压变为 720 V，匝数比为多少？
7. 变压器初级绕组加 120 V 交流电，若匝数比为 5，次级电压为多少？
8. 变压器匝数比为 10，要使次级获得 60 V 电压，初级电压应为多少？

15.4 节 降压变压器

9. 要将 120 V 降为 30 V，匝数比应是多少？
10. 变压器初级接 1200 V 电压，若匝数比为 0.2，则次级电压为多少？
11. 匝数比为 0.1，要在次级获得 6 V 交流电压，初级应接多少伏特的电压？

15.5 节 次级绕组的加载

12. 求图 15.44 中 I_s 和 R_L 的值。
13. 根据图 15.45 求下列问题的值。
    (a) 初级电流　　(b) 次级电流
    (c) 次级电压　　(d) 负载功率

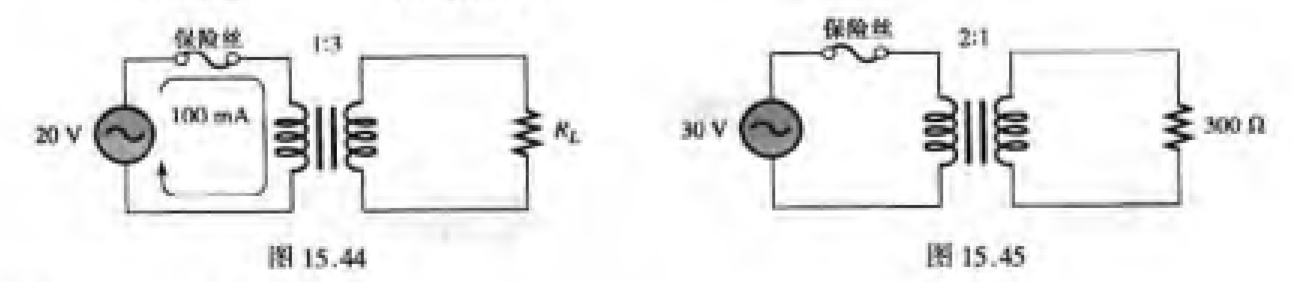


图 15.44　　图 15.45

15.6 节 反映负载

14. 图 15.46 中，从电源两端看，负载电阻为多少？
15. 图 15.47 中，要使初级回路的反映电阻值为 300 Ω，变压器匝数比应为多少？

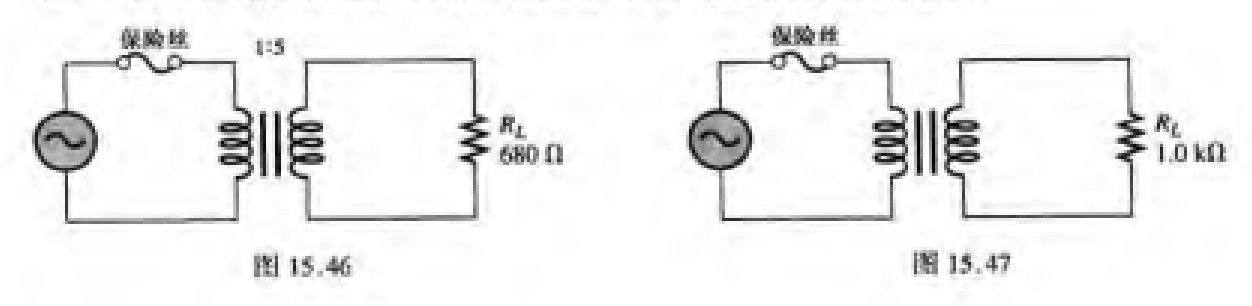


图 15.46　　图 15.47

15.7节 负载电阻和电源内阻的匹配

16. 图15.48中,要给4 Ω的喇叭传输最大功率,则变压器的匝数比应为多少?
17. 图15.48中,4 Ω的喇叭能获得的最大功率为多少?
*18. 图15.49中,若电源内阻为10 Ω,为每一个开关位置寻找适当的匝数比,以便向每一个负载传输最大功率。若初级绕组为1000匝,确定次级绕组的匝数。

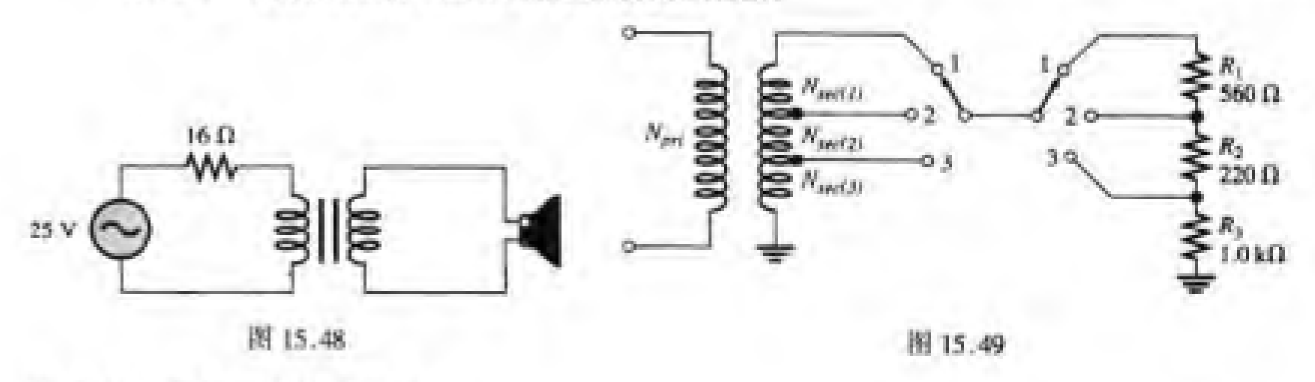


图15.48 图15.49

15.8节 用于隔离的变压器

19. 图15.50中,每个负载两端的电压为多少?

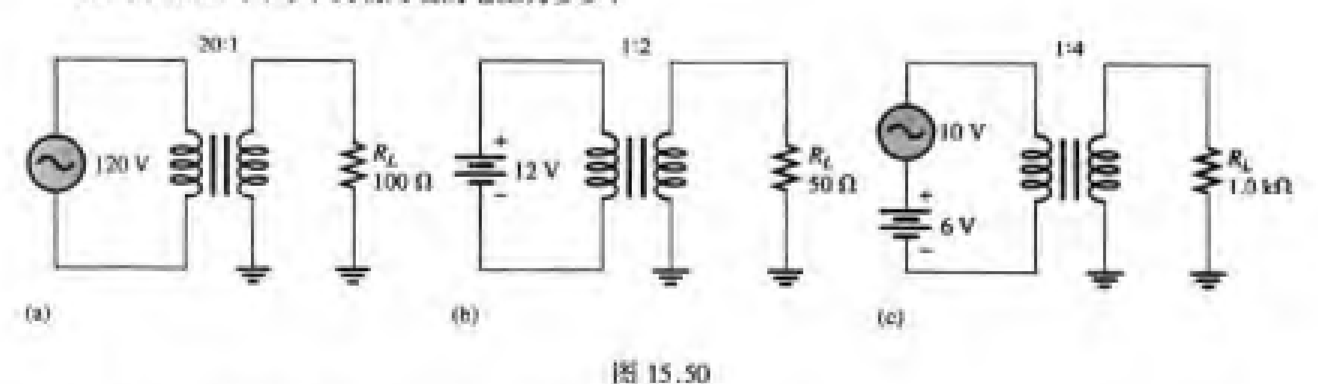


图15.50

20. 确定图15.51中没有读数的电表的电压。

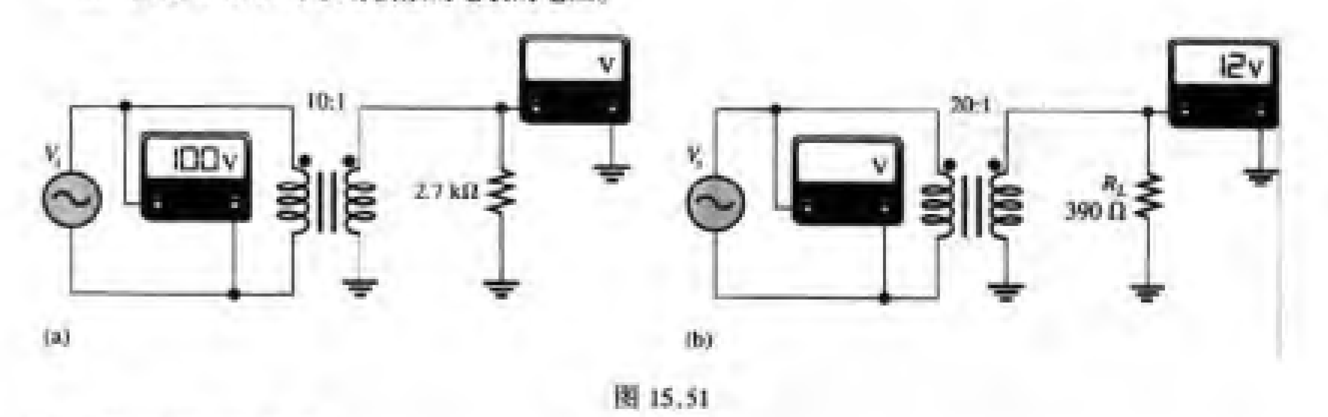


图15.51

15.9节 实际变压器

21. 某变压器输入到初级的功率为100 W。若绕组损耗功率为5.5 W,则负载的输出功率为多大?不计其他损耗。
22. 习题21中变压器的效率为多少?
23. 若初级绕组产生的磁通有2%未通过次级绕组,求变压器的耦合系数。
*24. 某变压器额定功率为1 kVA,工作在60 Hz,120 V交流电压下,次级电压为600 V,求:

(a) 最大负载电流是多少?

(b) 最小负载电阻是多少?

(c) 负载可接的最大电容是多少?

25. 要得到 2.5 kV 的次级电压和 10 A 的最大负载电流,变压器需要多大的额定视在功率?

* 26. 某变压器额定值为 5 kVA,2400/120 V,工作于 60 Hz 交流电压。

(a) 若次级电压为 120 V,匝数比为多少?

(b) 若初级电压为 2400 V,次级的额定电流为多大?

(c) 若初级电压为 2400 V,初级绕组额定电流为多大?

15.10 节 其他类型的变压器

27. 求图 15.52 中的所有未知电压。

28. 根据图 15.53 中所给出的次级电压,求初级绕组与每一个抽头所对应的次级绕组的匝数比。

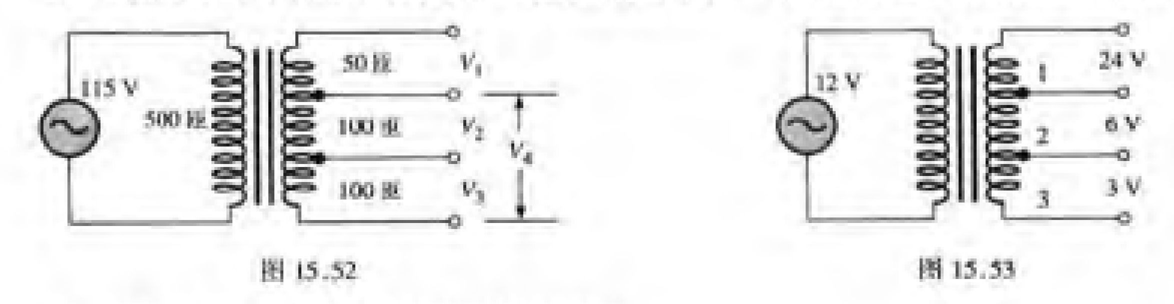


图 15.52　　图 15.53

29. 求图 15.54 中每一个自耦变压器的次级电压。

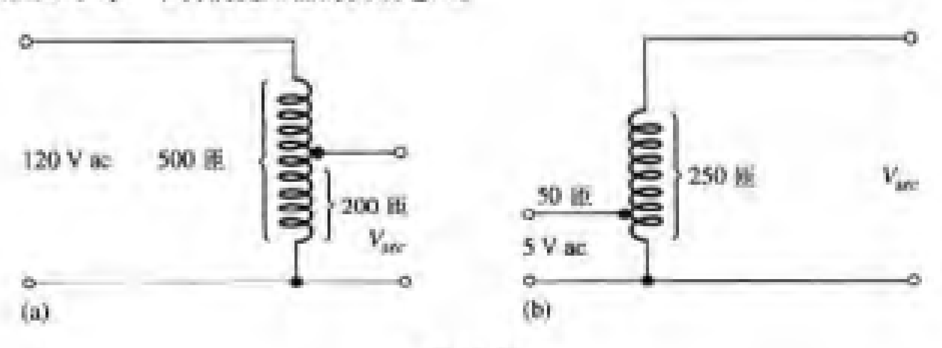


图 15.54

30. 图 15.55 中,每个初级绕组都能承受 120 V 交流电压。如何连接初级绕组,才能使变压器工作于 240 V 交流电压下?求每个次级绕组的电压。

* 31. 图 15.56 中变压器次级绕组带有抽头和负载,求下列问题:

(a) 所有负载电压和电流是多少?

(b) 初级回路中的反映电阻是多少?

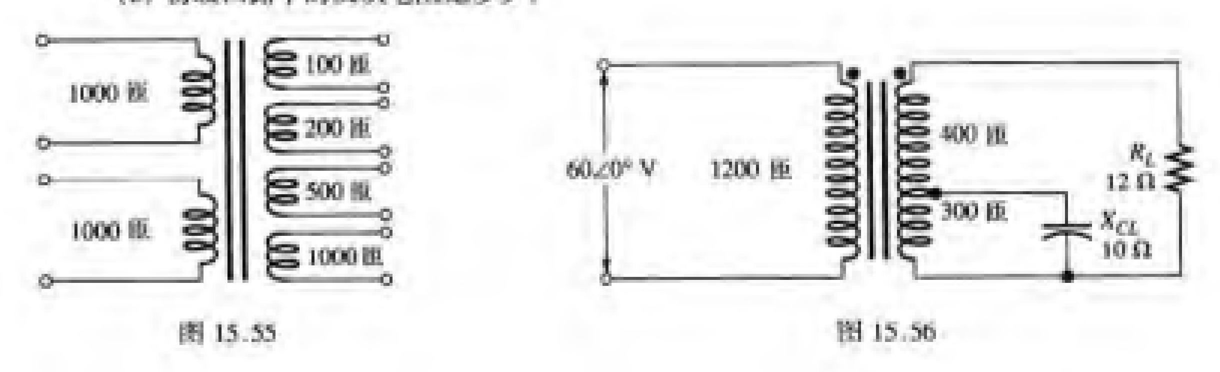


图 15.55　　图 15.56

15.11 节　故障检修

32. 如果在变压器初级绕组两端加 120 V 交流电后，测量次级电压，结果为 0 V。进一步检查发现初级电流和次级电流为 0。列出可能发生的故障，下一步该如何检查？
33. 若变压器初级绕组短路，可能发生什么情况？
34. 若检测变压器时，发现初级电压不为 0 但小于正常电压，最有可能的故障是什么？

EWB/Multisim 检修与分析

这些问题需要查阅本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

35. 打开文件 P15.35，测量次级电压，求匝数比。
36. 打开文件 P15.36，根据测量值确定绕组是否开路。
37. 打开文件 P15.37，确定电路是否有故障。

答案

15.1 节　互感

1. 互感是两个线圈之间的相互感应。
2. $L_M = k\sqrt{L_1 L_2} = 45\ \text{mH}$
3. 若 k 增加，互感电压增加。

15.2 节　基本变压器

1. 变压器的工作以互感原理为基础。
2. 匝数比是次级绕组匝数与初级绕组匝数的比值。
3. 线圈缠绕方向决定电压的相对极性。
4. $n = 250/500 = 0.5$

15.3 节　升压变压器

1. 升压变压器产生一个高于初级电压的次级电压。
2. V_{sec} 比 V_{pri} 大 5 倍。
3. $V_{sec} = nV_{pri} = 10(240\ \text{V}) = 2400\ \text{V}$

15.4 节　降压变压器

1. 降压变压器产生一个低于初级电压的次级电压。
2. $V_{sec} = (0.5)120\ \text{V} = 60\ \text{V}$
3. $n = 12\ \text{V}/120\ \text{V} = 0.1$

15.5 节　次级绕组的加载

1. I_{sec} 小于 I_{pri} 的一半。
2. $I_{sec} = (1000/250)0.5\ \text{A} = 2\ \text{A}$
3. $I_{pri} = (250/1000)10\ \text{A} = 2.5\ \text{A}$

15.6 节　反映负载

1. 反映电阻是次级电阻乘以匝数比倒数的平方，转移到初级回路中的电阻。
2. 匝数比决定反映电阻。
3. $R_{pri} = (0.1)^2 50\ \Omega = 0.5\ \Omega$
4. $n = 0.1$

15.7 节　负载电阻和电源内阻的匹配

1. 阻抗匹配使负载电阻等于电源内阻。
2. 当 $R_L = R_s$ 时，负载得到最大功率。
3. $R_{pri} = (100/50)^2 100\ \Omega = 400\ \Omega$

15.8 节　用于隔离的变压器

1. 电隔离的意思是初级、次级回路之间没有电流的传输。
2. 变压器不能耦合直流电压。

15.9 节　实际变压器

1. 在实际变压器中，电能转化成热能的损耗降低了效率。理想变压器的效率为 100%。
2. 当 $k = 0.85$ 时，初级绕组产生的磁通的 85% 通过次级绕组。
3. $I_L = 10\ \text{kVA}/250\ \text{V} = 40\ \text{A}$

15.10 节　其他类型的变压器

1. $V_{sec} = (10)240\ \text{V} = 2400\ \text{V}$，$V_{sec} = (0.2)240\ \text{V} = 48\ \text{V}$
2. 自耦变压器与相同指标的一般变压器相比体积小、重量轻；自耦变压器没有电隔离。

15.11 节　故障检修

1. 变压器最常见的故障是线圈断路，其次是线圈短路。
2. 超负荷工作会引起故障。

技术实践

1. 用欧姆表检测线圈开路，不合理的次级电压表示线圈短路。
2. 短路会引起保险丝熔断。

实例相关练习

15.1　0.75

15.2　387 μH

15.3　5000 匝

15.4　480 V

15.5　57.6 V

15.6　5 mA；400 mA

15.7　6 Ω

15.8　0.354

15.9　0.0707 或 14.14:1

15.10　85.2%

15.11　$V_{AB} = 12\ \text{V}$，$V_{CD} = 480\ \text{V}$，$V_{(CT)C} = V_{(CT)D} = 240\ \text{V}$，$V_{EF} = 24\ \text{V}$

15.12　增加到 1.75 kVA

自测题

1.(b)　2.(c)　3.(d)　4.(a)　5.(b)　6.(c)　7.(d)　8.(b)
9.(a)　10.(c)　11.(d)　12.(c)　13.(a)　14.(c)

故障检修测验

1.(b)　2.(a)　3.(c)　4.(a)　5.(a)　6.(b)　7.(c)　8.(b)　9.(c)　10.(c)

第 16 章　*RC* 电路

引言

RC 电路是含有电阻和电容的电路，是我们将要学习的电抗性电路的基本类型之一。在本章中，将介绍基本的串联和并联 *RC* 电路，及其对正弦交流电压的响应。还将进一步分析串并联电路混合的情况。当然，我们将会讨论 *RC* 电路中无功功率和视在功率的关系，以及一些基本 *RC* 电路的应用。*RC* 电路主要用于滤波器、耦合放大器、振荡器和波形电路之中。最后，介绍诊断故障电路的方法。

知识点及其学习方法选择

本章和第 17 章及第 18 章都由四部分组成：串联电抗性电路、并联电抗性电路、串并联混合电抗性电路和专题讨论。这样划分的目的在于，可通过两种途径更好地掌握第 16 章、第 17 章和第 18 章中电抗性电路所涵盖的知识点。

选择 1：第一种途径是首先了解 *RC* 电路的全部知识点(参见第 16 章)，随后理解 *RL* 电路的全部知识点(参见第 17 章)，最后掌握 *RLC* 电路的全部知识点(参见第 18 章)。通过这种途径，可以很容易地顺次学到各章的知识点。

选择 2：第二种途径是首先学习串联电抗性电路，然后了解并联电抗性电路，接着是串并联混合电抗性电路，最后是专题讨论。通过这种途径，可按照以下顺序学习：第一部分，第 16 章、第 17 章和第 18 章的串联电抗性电路。第二部分，第 16 章、第 17 章和第 18 章的并联电抗性电路。第三部分，第 16 章、第 17 章和第 18 章的串并联混合电抗性电路。最后，第四部分是各章专题讨论的介绍。

本章目标

第一部分：串联电抗电路

- 在 *RC* 电路中能够正确描述电压和电流的关系
- 在串联 *RC* 电路中如何确定阻抗和相移
- 掌握分析 *RC* 串联电路的方法

第二部分：并联电抗电路

- 在并联 *RC* 电路中如何确定阻抗和相位角
- 掌握分析 *RC* 并联电路的方法

第三部分：串并联混合 *RC* 电路的分析

- 掌握分析串并联 *RC* 电路的方法

第四部分：专题讨论

- 确定 *RC* 电路的功率
- 论述一些 *RC* 电路的基本应用
- 如何发现并检测 *RC* 电路的故障

主要术语

- 阻抗
- 电容性电纳（B_C）
- 导纳（Y）
- 视在功率（P_a）
- 功率因数
- 滤波器
- 频率响应
- 截止频率
- 带宽

技术实践

在放大电路中，RC 输入网络的频率响应与以前在第 13 章中学过的知识点很相似，也是本章学习的重点。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

第一部分：串联电抗电路

16.1 RC 电路的正弦响应

对于任何一种 RC 电路，在正弦电压作用下，电路中产生的电压会比输入电压小，电路中的电流也是正弦的，并且电压和电流的频率与输入电压频率相同。由于电容的存在，电压和电流之间有相移，相移的大小取决于电阻值和电容电抗值的大小。

学完本节后，读者应该能够：

- 描述 RC 电路中电压和电流的关系
- 论述电压和电流的波形
- 论述相位差
- 描述各种类型的信号发生器

如图 16.1 所示，电阻的电压（V_R）、电容的电压（V_C）和电流（I）都是正弦波，并且与信号源的频率相同。由于电容的存在，电路中电压和电流之间有相移。通过学习将了解到，电阻的电压和电流超前于信号源的电压，而电容的电压滞后于信号源的电压。电流与电容的电压之间的相移总是 90°。这些显著的相位关系在图 16.1 中显示。

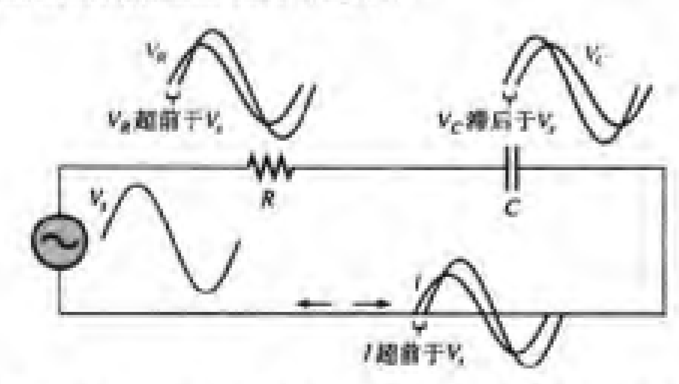


图 16.1 在正弦响应中，V_R、V_C 和 I 相对于信号源电压的一般相位关系。V_R 超前于 V_s；V_C 滞后于 V_s；I 超前于 V_s。V_R 和 I 是同相位，而 V_R 和 V_C 相差 90° 相移

电压和电流的振幅以及相位之间的关系取决于电阻和电容电抗值的大小。一个电路是纯电阻电路时，输入电压和电路中总电流之间的相位角是零。一个电路是纯电容电路时，输入电压和电路中总电流之间的相移是 90°，电流超前于电压。而当一个电路是混合电路，即电路中既有电阻又有电容电抗时，输入电压和电路中总电流之间的相移在 0°与 90°之间，值的大小取决于电阻和电容电抗的大小。

16.1.1 信号发生器

一个电路用于实验，或者需要进行故障检修时，常用信号发生器为其提供输入电压，如图 16.2 所示。根据这些信号发生器性能的不同，可分成正弦信号发生器、正弦和方波信号发生器，以及函数发生器三种类型。其中，正弦信号发生器只能产生正弦波；正弦和方波信号发生器既可以产生正弦波，又可以产生方波。而函数发生器不仅可以产生正弦波，还可以产生脉冲波和三角(斜坡)波。

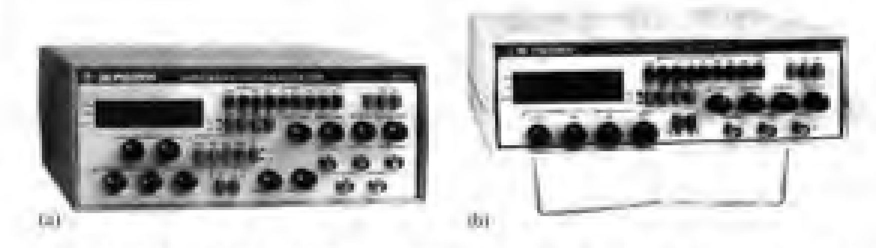


图 16.2 实验和故障检修中使用的信号(函数)发生器(经 B&K Precision Corp. 允许使用此图)

16.1 节练习

1. 60 Hz 正弦电压作用在一个 *RC* 电路中，问电容电压的频率是多少？电流的频率是多少？
2. 在串联 *RC* 电路中，导致 V_s 和 I 产生相移的原因是什么？
3. 在 *RC* 电路中，当电阻阻值大于电容电抗时，输入电压和电路中总电流之间的相移是更接近于 0°还是更接近于 90°？

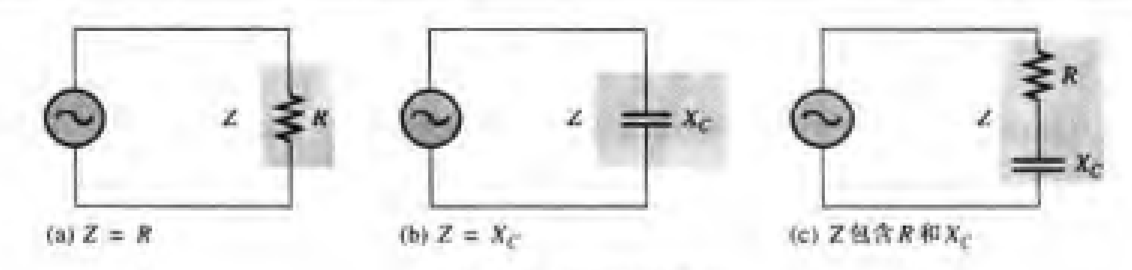
16.2 串联 *RC* 电路的阻抗和相移

在任何一种 *RC* 电路中，阻抗表示电路对正弦电流所起的阻碍作用，单位是欧姆。相移角是电路中的总电流和电源电压的相位差。

学完本节后，读者应该能够：

- 确定串联 *RC* 电路中的阻抗和相移角
- 深刻理解阻抗的定义
- 用复数形式表示电容电抗
- 用复数形式表示总阻抗
- 画出阻抗三角图
- 计算阻抗的大小和相移角

在纯电阻电路中，阻抗仅仅等于各个电阻的总和。在纯电容性电路中，阻抗等于各个电容电抗的总和。在串联 *RC* 电路中，阻抗是由电阻和电容电抗共同决定的。这几种情况如图 16.3 所示。阻抗的大小用符号 Z 来表示。



(a) $Z = R$　　(b) $Z = X_C$　　(c) Z 包含 R 和 X_C

图 16.3　三种情况的阻抗

回顾第 13 章可知，电容电抗是用直角坐标系中的复数形式表示的，即：

$$\mathbf{X}_C = -jX_C \quad (16.1)$$

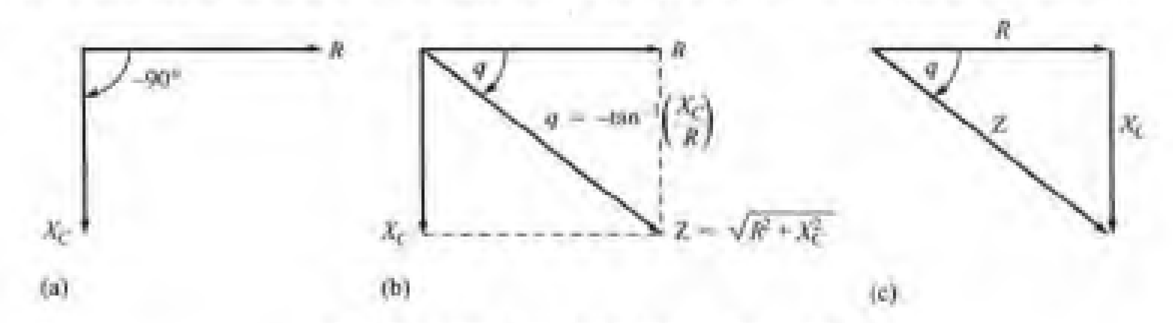
其中，黑体字 $\mathbf{X}_C$ 表示一个相量值(大小和角度)，而 X_C 仅仅表示相量的幅度。在图 16.4 所示的串联 RC 电路中，总阻抗是 R 和 $-jX_C$ 的相量和，表示为：

$$\mathbf{Z} = R - jX_C \quad (16.2)$$

图 16.4　串联 RC 电路

16.2.1　阻抗三角形

在交流电路的分析中，R 和 X_C 都当做相量，用图 16.5(a)所示的相量图表示。其中，X_C 相对于 R 相差 $-90°$。这种相差的原因是，在串联 RC 电路中，电容的电压滞后于电流，同样也滞后于电阻的电压，并且都是滞后 90°。既然 **Z** 是 R 和 $-jX_C$ 的相量和，因此，**Z** 可用图 16.5(b)所示的相量图表示。**Z**、R 和 X_C 组成了一个如图 16.5(c)所示的直角三角形，这个直角三角形叫做阻抗三角形。与相量所对应的三角形的边长表示相量的大小，单位是欧姆；而角度 θ 是 RC 电路的相移角，表示输入电压和电流之间的相位差。



(a)　　(b)　　(c)

图 16.5　串联 RC 电路中阻抗三角形的形成

根据直角三角形法则(勾股定理)，阻抗的大小(长度)可以用电阻和电抗表示为：

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (16.3)$$

斜体字母 Z 表示相量 **Z** 的模，单位是欧姆。

相移角 θ 表示为：

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) \quad (16.4)$$

其中，符号 $\tan^{-1}$ 表示求反正切，在计算器上可以同时按 2nd 键和 $\tan^{-1}$ 键来获取。把相量的模和角度结合起来，阻抗极坐标形式的相量可表示为：

$$\mathbf{Z}=\sqrt{R^2+X_C^2}\angle-\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) \tag{16.5}$$

例 16.1 对图 16.6 所示电路，写出每个电路阻抗的直角坐标形式和极坐标形式。

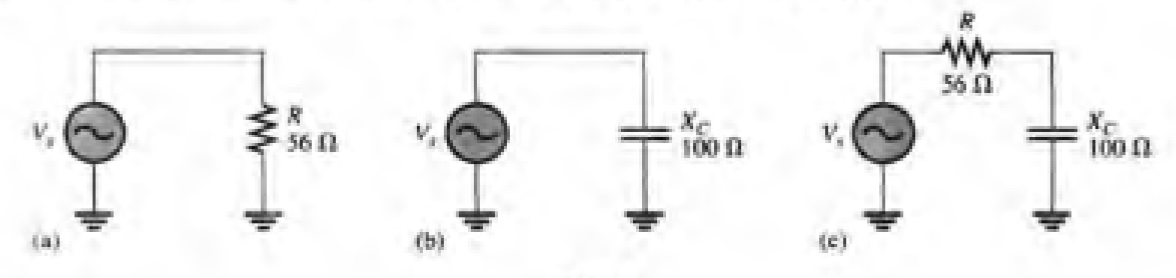


图 16.6

解:在图 16.6(a)所示的电路中,阻抗为:

$\mathbf{Z}=R-j0=R=56\ \Omega$ 直角坐标形式($X_C=0$)

$\mathbf{Z}=R\angle0°=56\angle0°\ \Omega$ 极坐标形式

在该图中,阻抗就是电阻,相移角等于零。由于是纯电阻电路,所以电压与电流之间没有相移。

在图 16.6(b) 所示的电路中,阻抗为:

$\mathbf{Z}=0-jX_C=-j100\ \Omega$ 直角坐标形式($R=0$)

$\mathbf{Z}=X_C\angle-90°=100\angle-90°\ \Omega$ 极坐标形式

在该图中,阻抗的大小仅仅等于电容抗的大小,相移角是 $-90°$,因为电容导致了电流超前电压 90°。

在图 16.6(c)所示的电路中,阻抗的直角坐标形式为:

$$\mathbf{Z}=R-jX_C=56\ \Omega-j100\ \Omega$$

阻抗的极坐标形式为:

$$\mathbf{Z}=\sqrt{R^2+X_C^2}\angle-\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

$$=\sqrt{(56\ \Omega)^2+(100\ \Omega)^2}\angle-\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{56\ \Omega}\right)=115\angle-60.8°\ \Omega$$

在这种情况下,阻抗是电阻和电容电抗的相量和。相移角是由相应的 X_C 和 R 的值共同确定的。在第 12 章中,已经说明了如何用计算器进行直角坐标和极坐标形式之间的变换,而这种变换可以用在此类问题中。

练习:用计算器实现图 16.6(c)所示阻抗的直角坐标形式和极坐标形式的变换,画出阻抗的相量图。

16.2 节练习

1. 已知某 RC 电路的阻抗是 150 Ω - j220 Ω,求电阻的阻值是多少?电容电抗的值是多少?
2. 某一串联 RC 电路的总电阻阻值是 33 kΩ,电容电抗的值是 50 kΩ。请用直角坐标形式写出阻抗的相量表示式。
3. 对于第 2 题中的电路,阻抗的大小是多少?相移角是多少?

16.3 串联 RC 电路的分析

根据前面所讲的内容,我们已经学习了如何表示一个串联 RC 电路的阻抗。现在,介绍欧姆定律和基尔霍夫电压定律,它们常用于分析 RC 电路。

学完本节后，读者应该能够：

- 分析 RC 电路
- 将欧姆定律和基尔霍夫电压定律用于 RC 电路的分析中
- 用相量表示电压和电流
- 明确阻抗和相移随频率变化的规律

16.3.1 欧姆定律

欧姆定律应用于串联 RC 电路中时，涉及的变量是相量 **Z**、**V** 和 **I**。请牢记：黑体字母简要地说明所表示的变量是相量，而相量包括大小和角度。欧姆定律三种等效的表示方式如下：

$$\mathbf{V}=\mathbf{IZ} \tag{16.6}$$

$$\mathbf{I}=\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}} \tag{16.7}$$

$$\mathbf{Z}=\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} \tag{16.8}$$

在第 12 章中介绍过，用极坐标形式表示相量时，相量的乘法和除法计算很容易完成。既然欧姆定律的计算中包含乘法和除法，所以应该用极坐标形式来表示电压、电流和阻抗。下面的两道例题说明了输入电压和输入电流之间的关系。在例 16.2 中，电流是参考相量。在例 16.3 中，电压是参考相量。注意在两种情况下，参考相量与 x 轴同向。

例 16.2 假设在图 16.7 中已知电流用极坐标形式表示为 $\mathbf{I}=0.2\angle 0°$ mA，确定用极坐标形式表示的电压源电压，并画出表示电压源的电压和电流之间关系的矢量图。

解：电容电抗的大小为：

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi(1000\ \text{Hz})(0.01\ \mu\text{F})}=15.9\ \text{k}\Omega$$

总阻抗的直角坐标形式为：

$$\mathbf{Z}=R-jX_C=10\ \text{k}\Omega-j15.9\ \text{k}\Omega$$

用极坐标形式表示为：

$$\mathbf{Z}=\sqrt{R^2+X_C^2}\angle-\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

$$=\sqrt{(10\ \text{k}\Omega)^2+(15.9\ \text{k}\Omega)^2}\angle-\tan^{-1}\left(\frac{15.9\ \text{k}\Omega}{10\ \text{k}\Omega}\right)=18.8\angle-57.8°\ \text{k}\Omega$$

用欧姆定律求电压源电压为：

$$\mathbf{V}_s=\mathbf{IZ}=(0.2\angle 0°\ \text{mA})(18.8\angle-57.8°\ \text{k}\Omega)=\mathbf{3.76\angle-57.8°\ V}$$

电压源电压的大小是 3.76 V，相对于电流的角度是 -57.8°，意思是电压滞后于电流 57.8°。相量图如图 16.8 所示。

练习：如图 16.7 所示，如果 $f=2$ kHz，$\mathbf{I}=0.2\angle 0°$ A，求 $\mathbf{V}_s$？

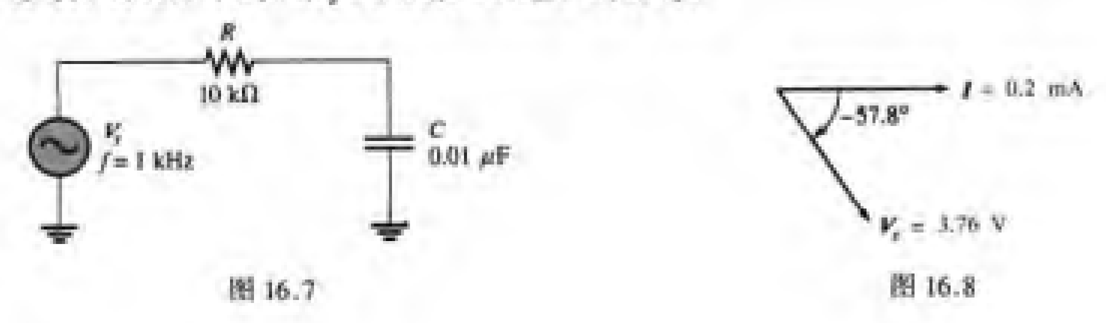


图 16.7　　图 16.8

例 16.3 求图 16.9 所示电路中的电流,并画出表示电压源的电压与电流之间关系的相量图。

解: 电容电抗的大小为:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1.5\ \text{kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 4.82\ \text{k}\Omega$$

总阻抗的直角坐标形式为:

$$\boldsymbol{Z} = R - jX_C = 2.2\ \text{k}\Omega - j4.82\ \text{k}\Omega$$

变换成极坐标形式为:

$$\boldsymbol{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(2.2\ \text{k}\Omega)^2 + (4.82\ \text{k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{4.82\ \text{k}\Omega}{2.2\ \text{k}\Omega}\right) = 5.30\angle -65.5^\circ\ \text{k}\Omega$$

根据欧姆定律,电流为:

$$\boldsymbol{I} = \frac{\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{Z}} = \frac{10\angle 0^\circ\ \text{V}}{5.30\angle -65.5^\circ\ \text{k}\Omega} = \mathbf{1.89\angle 65.5^\circ\ mA}$$

电流的大小是 1.89 mA。正的相位角是 65.5°,表明电流超前于电压 65.5°,相量图如图 16.10 所示。

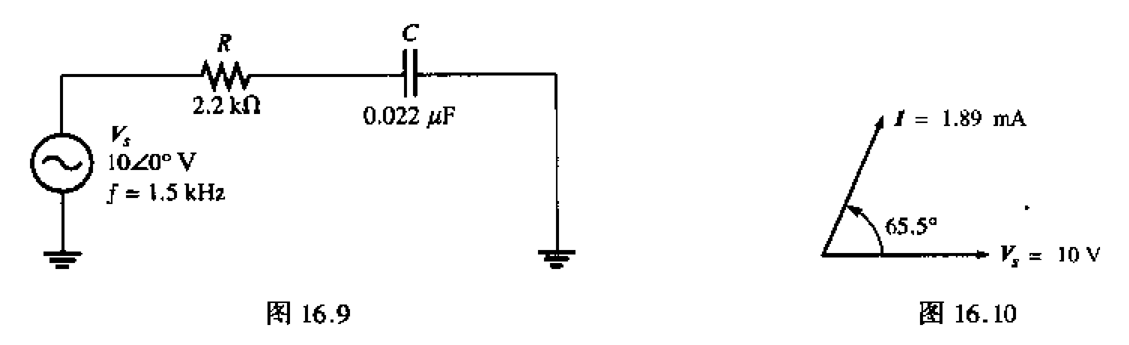


图 16.9

图 16.10

练习:在图 16.9 中,如果频率增加到 5 kHz,求 $\boldsymbol{I}$。

16.3.2 电压和电流的相位关系

在串联电路中,流过电阻器和电容的电流是处处相等的。而电阻上的电压和电流是同相位的,电容的电压滞后于电流 90°。因此,电阻上的电压 V_R 与电容上的电压 V_C 的相位差为 90°,其波形如图 16.11 所示。

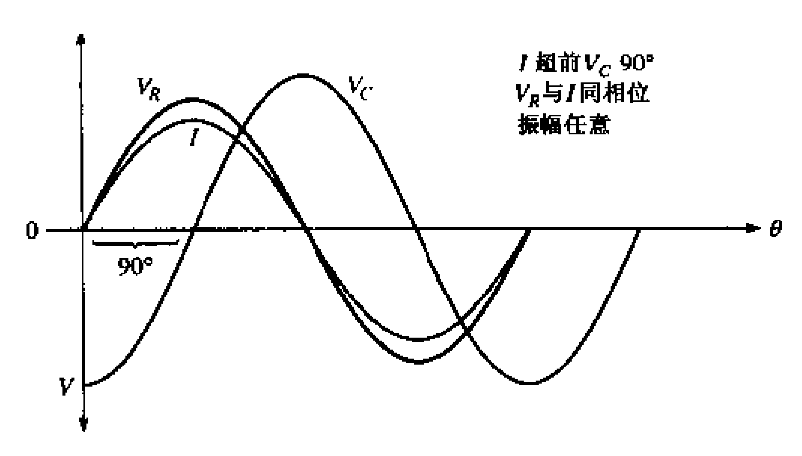


图 16.11 串联 RC 电路中电压和电流的相位关系

根据基尔霍夫电压定律可知，总电压降必然等于输入电压。然而，由于 V_R 和 V_C 彼此相位不同，因此，它们应该以相量的形式相加，V_C 滞后于 V_R 90°，如图 16.12(a)所示。在图 16.12(b)中，V_s 是 V_R 和 V_C 的相量和，用直角坐标形式表示为：

$$\boldsymbol{V}_s = \boldsymbol{V}_R - j\boldsymbol{V}_C \tag{16.9}$$

也可用极坐标形式表示为：

$$\boldsymbol{V}_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{V_C}{V_R}\right) \tag{16.10}$$

其中，电源电压的幅度为：

$$V_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \tag{16.11}$$

电阻电压和电源电压之间的相位差为：

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{V_C}{V_R}\right) \tag{16.12}$$

由于电阻电压和电流同相，θ 也表示电源电压和电流之间的相位差，图 16.13 是图 16.11 中波形所示的电压和电流的完整相量图。

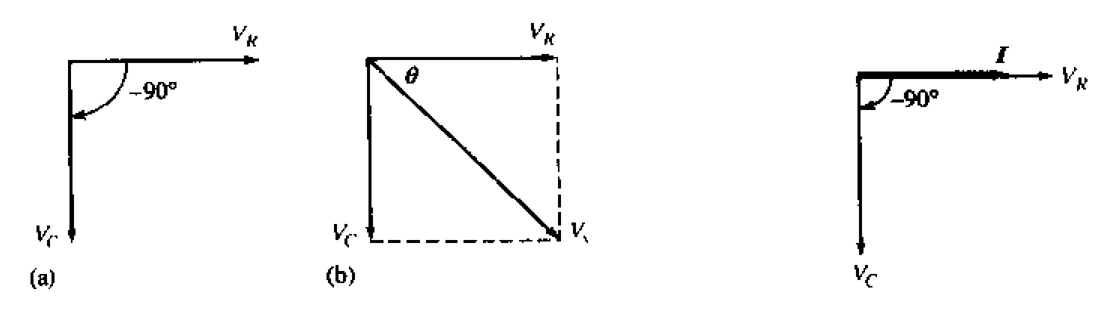


图 16.12 串联 RC 电路电压相量图

图 16.13 图 16.11 中波形所示的电压和电流的相量图

16.3.3 随频率变化的阻抗

我们已经知道，容性电抗与频率相反。由于 $Z=\sqrt{R^2+X_C^2}$，可以发现当 X_C 增加时，平方根下整个式子的值增加，因此总的阻抗幅度值也会增加。当 X_C 减少时，总的阻抗值会减少，所以在 RC 电路中 Z 与频率的变化相反。

图 16.14 表明，在 RC 串联电路中电源电压的大小保持恒定，而频率升高或降低时，电压和电流是如何变化的。在图 16.14(a)中，频率增加时 X_C 减少，所以电容两端的电压减少。同时，Z 随 X_C 的减少而减少，从而引起电流增加，电流的增加引起 R 两端的电压增加。在图 16.14(b)中，频率降低时 X_C 增加，所以电容两端的电压增加。同时，Z 随 X_C 的增加而增加，引起电流减少，电流的减少引起 R 两端的电压减小。

由 Z 和 X_C 变化而产生的影响如图 16.15 所示。频率增加时，Z 两端的电压因为是定值而保持不变。同时，C 两端的电压下降，而电流 V_s 增加，表明 Z 是减小的。上述变化中相反关系的依据是欧姆定律($Z = V_Z/I$)。电流增加说明 X_C 减小($X_C = V_C/I$)。V_C 减小表示 X_C 减小。

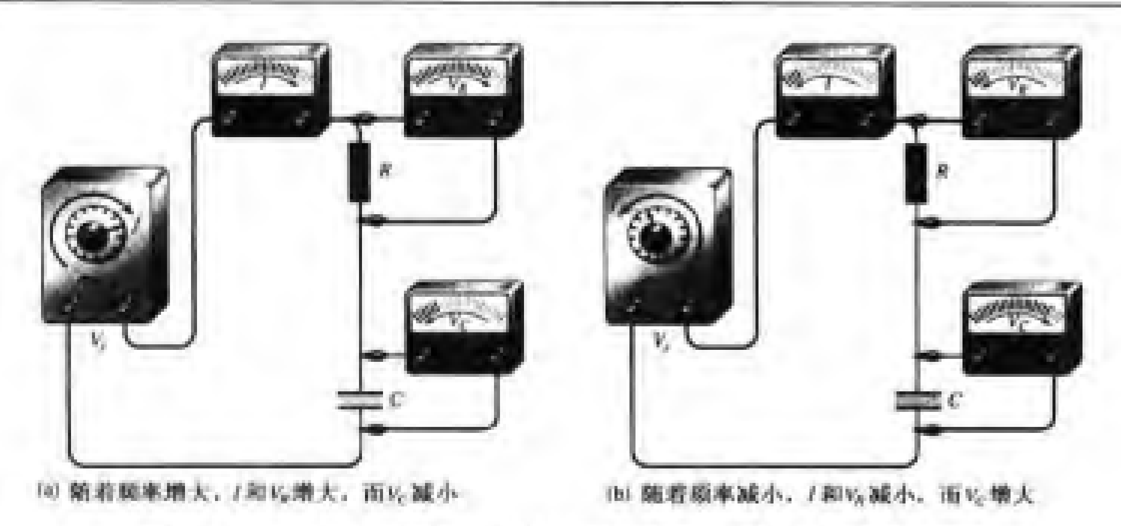


图 16.14 电源电压振幅不变,阻抗随频率变化时,对电压和电流的影响

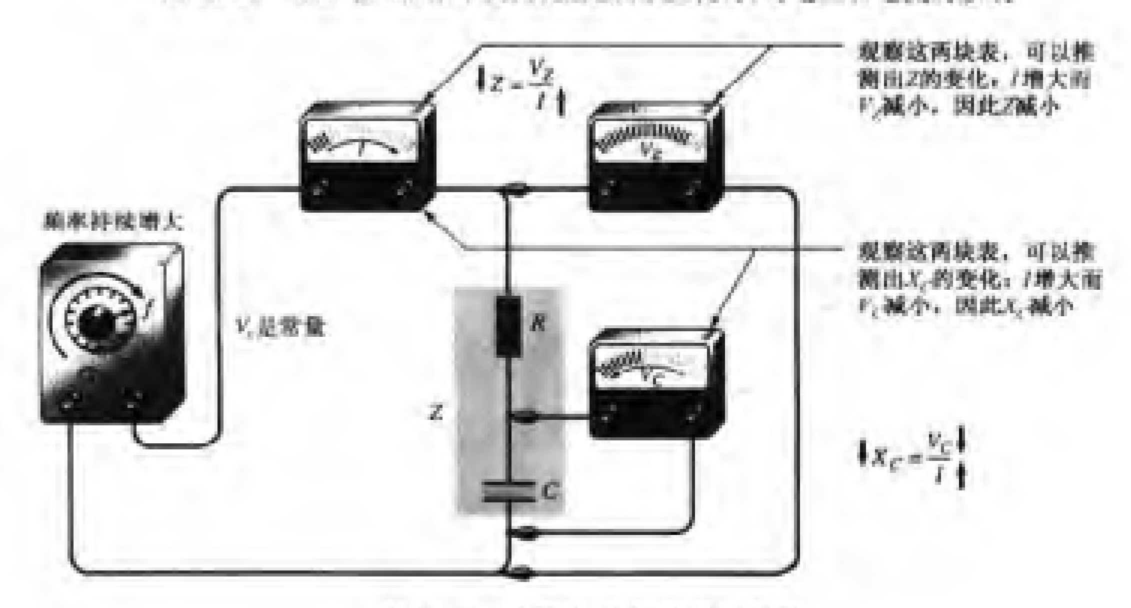


图 16.15 Z 和 X_C 随频率的变化图

16.3.4 随频率而变的相位差

在串联 RC 电路中,由 X_C 引入了相位差,所以 X_C 的改变会导致相位差改变。频率增大时 X_C 减小,结果使相位差也减小;频率减小时 X_C 增大,结果使相位差也增大。因为 I 与 V_R 同相,所以 V_s 与 V_R 之间的夹角就是电路的相位差。测量 V_R 的相位,也就相当于测量 I 的相位。通常,可以用示波器来观测相位差。

图 16.16 中利用阻抗三角形说明,当频率变化时,X_C、Z 和 θ 是怎样改变的。R 保持不变,由于 X_C 随频率反向变化,所以总阻抗和相位差也随频率的增加而减小。例 16.4 显示了这一点。

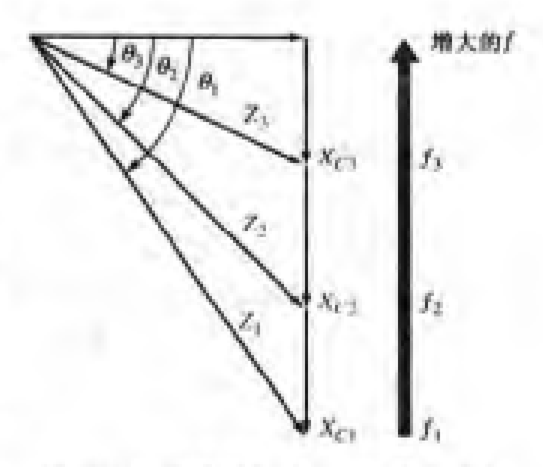


图 16.16 频率增加时,X_C、Z 和 θ 减小。频率值与阻抗三角形相对应

例 16.4 在图 16.17 所示的串联 RC 电路中，输入频率为以下数值时，试确定与其对应的总的阻抗值和相位差。

(a) 10 kHz (b) 20 kHz (c) 30 kHz



图 16.17

解：(a) $f = 10$ kHz，

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(10\ \text{kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 1.59\ \text{k}\Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(1.0\ \text{k}\Omega)^2 + (1.59\ \text{k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{1.59\ \text{k}\Omega}{1.0\ \text{k}\Omega}\right) = 1.88\angle -57.8°\ \text{k}\Omega$$

所以，$Z = \mathbf{1.88\ k\Omega}$，$\theta = \mathbf{-57.8°}$。

(b) $f = 20$ kHz，

$$X_C = \frac{1}{2\pi(20\ \text{kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 796\ \Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(1.0\ \text{k}\Omega)^2 + (796\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{796\ \Omega}{1.0\ \text{k}\Omega}\right) = 1.28\angle -38.5°\ \text{k}\Omega$$

所以，$Z = \mathbf{1.28\ k\Omega}$，$\theta = \mathbf{-38.5°}$。

(c) $f = 30$ kHz，

$$X_C = \frac{1}{2\pi(30\ \text{kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 531\ \Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(1.0\ \text{k}\Omega)^2 + (531\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{531\ \Omega}{1.0\ \text{k}\Omega}\right) = 1.13\angle -28.0°\ \text{k}\Omega$$

所以，$Z = \mathbf{1.13\ k\Omega}$，$\theta = \mathbf{-28.0°}$。

注意：随着频率的增加，X_C、Z 和 θ 减小。

练习：在图 16.17 所示的串联 RC 电路中，$f = 1$ kHz 时，求总的阻抗值和相位差为多少？

16.3 节练习

1. 在某串联 RC 电路中，$V_R = 4$ V，$V_C = 6$ V，求电源电压值是多少？
2. 在第 1 题中，电源电压和电流之间的相位差是多少？
3. 在一个串联 RC 电路中，电容电压与电阻电压之间的相位差是多少？
4. 在一个串联 RC 电路中，输入电压频率增大时，电容电抗、总阻抗和相位差分别发生怎样的变化？

第二部分：并联电抗电路

16.4 并联电抗电路的阻抗和相位差

在本节中我们将学习怎样确定并联 RC 电路的阻抗和相位差，以及电容的电纳和并联 RC 电路的导纳。

学完本节后，读者应该能够：

- 确定并联 RC 电路中的阻抗和相位差
- 描述复杂形式的总阻抗
- 论述和计算电导、电容电纳和导纳

图 16.18 显示一个基本的并联 RC 电路与一个交流电压源相连。

电路总阻抗的描述如下。按照相量代数的规则，因为该电路中只有两个元件并联，所以这两个并联元件的总阻抗为：

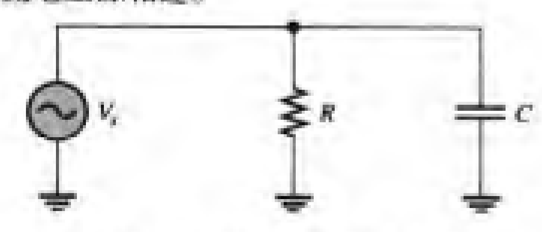


图 16.18　基本的并联 RC 电路

$$\mathbf{Z} = \frac{(R\angle 0^\circ)(X_C\angle -90^\circ)}{R - jX_C}$$

将分子中的模相乘，角度相加，并且将分母转化为极坐标形式，则得到：

$$\mathbf{Z} = \frac{RX_C\angle(0^\circ - 90^\circ)}{\sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)}$$

现在，将上式中分子和分母的模分离出来，再将分子和分母中的角度相减，得：

$$\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)\angle\left(-90^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)\right) \tag{16.13}$$

式(16.13)表示的是基本并联 RC 电路的总阻抗。其中，阻抗的模为：

$$Z = \frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \tag{16.14}$$

输入电压与总电流之间的相位差为：

$$\theta = -90^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) \tag{16.15}$$

上式也可以等效表示为：

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right) \tag{16.16}$$

例 16.5　确定图 16.19 中每一个电路的总阻抗的模和相位差。

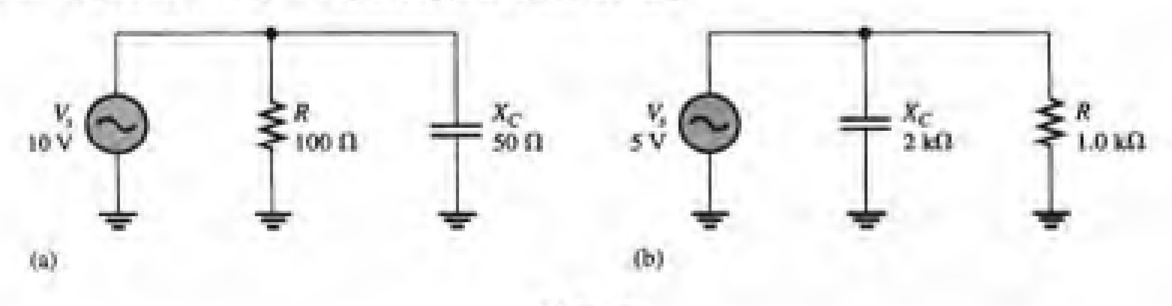


图 16.19

解：在图 16.19(a)中，电路的总阻抗为：

$$Z = \left(\frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)\angle -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right)$$

$$= \left(\frac{(100\ \Omega)(50\ \Omega)}{\sqrt{(100\ \Omega)^2 + (50\ \Omega)^2}}\right)\angle -\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{50\ \Omega}\right) = 44.7\angle -63.4°\ \Omega$$

所以，$Z = \mathbf{44.7\ \Omega}$，$\theta = \mathbf{-63.4°}$。

在图 16.19(b)中，电路的总阻抗为：

$$Z = \left(\frac{(1.0\ k\Omega)(2\ k\Omega)}{\sqrt{(1.0\ k\Omega)^2 + (2\ k\Omega)^2}}\right)\angle -\tan^{-1}\left(\frac{1.0\ k\Omega}{2\ k\Omega}\right) = 894\angle -26.6°\ \Omega$$

所以，$Z = \mathbf{894\ \Omega}$，$\theta = \mathbf{-26.6°}$。

练习：在图 16.19(a)中，如果频率增大一倍，试确定 **Z**。

16.4.1 电导、电纳和导纳

所谓电导 G，是电阻的倒数。其相量形式表示为：

$$\mathbf{G} = \frac{1}{R\angle 0°} = G\angle 0° \tag{16.17}$$

在并联 RC 电路中需要引入两个新的变量：电容电纳和导纳。电容电纳(B_C)定义为电容电抗的倒数，其相量形式为：

$$\mathbf{B}_C = \frac{1}{X_C\angle -90°} = B_C\angle 90° = +jB_C \tag{16.18}$$

导纳(Y)定义为阻抗的倒数，其相量形式为：

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{Z\angle \pm\theta} = Y\angle \mp\theta \tag{16.19}$$

电容电纳、电导和导纳的单位是西门子(S)，也就是欧姆的倒数。

在分析并联 RC 电路时，使用电导(G)、电容电纳(B_C)和导纳(Y)比使用电阻(R)、电容电抗(X_C)和阻抗(Z)要方便简单得多。在图 16.20 所示的并联 RC 电路中，总导纳等于电导与电容电纳的相量和，即：

$$\mathbf{Y} = G + jB_C \tag{16.20}$$

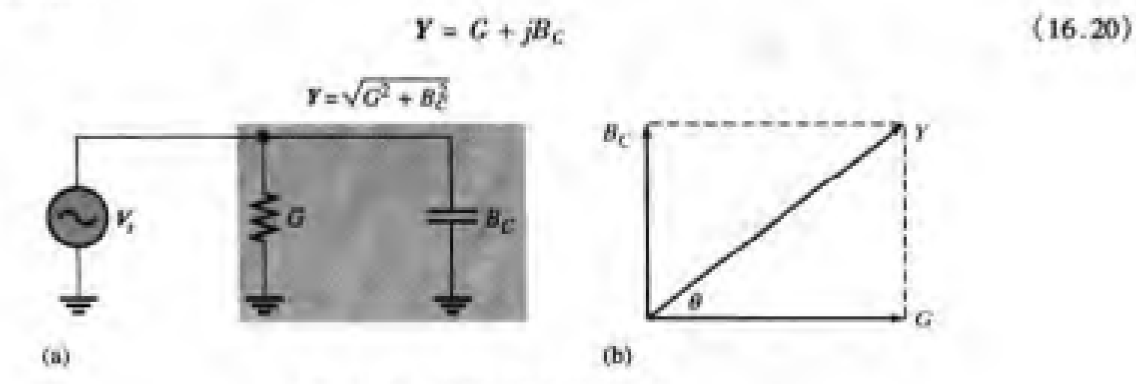


图 16.20 并联 RC 电路的导纳

例 16.6 求图 16.21 所示电路的总导纳(Y)和总阻抗(Z)，并画出导纳的相量图。

解：从图 16.21 得 $R = 330\ \Omega$；所以，$G = 1/R = 1/330\ \Omega = 3.03\ \text{mS}$。电容电抗为：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1000\ \text{Hz})(0.22\ \mu\text{F})} = 723\ \Omega$$

电容电纳为：

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{723\ \Omega} = 1.38\ \text{mS}$$

总导纳为：

$$\mathbf{Y}_{tot} = G + jB_C = \mathbf{3.03\ mS} + \boldsymbol{j}\mathbf{1.38\ mS}$$

也可用相量表示为：

$$\mathbf{Y}_{tot} = \sqrt{G^2 + B_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{B_C}{G}\right)$$
$$= \sqrt{(3.03\ \text{mS})^2 + (1.38\ \text{mS})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.38\ \text{mS}}{3.03\ \text{mS}}\right) = \mathbf{3.33\angle 24.5^\circ\ mS}$$

总导纳转换为总阻抗：

$$\mathbf{Z}_{tot} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{tot}} = \frac{1}{(3.33\angle 24.5^\circ\ \text{mS})} = \mathbf{300\angle -24.5^\circ\ \Omega}$$

导纳的相量图如图16.22所示。

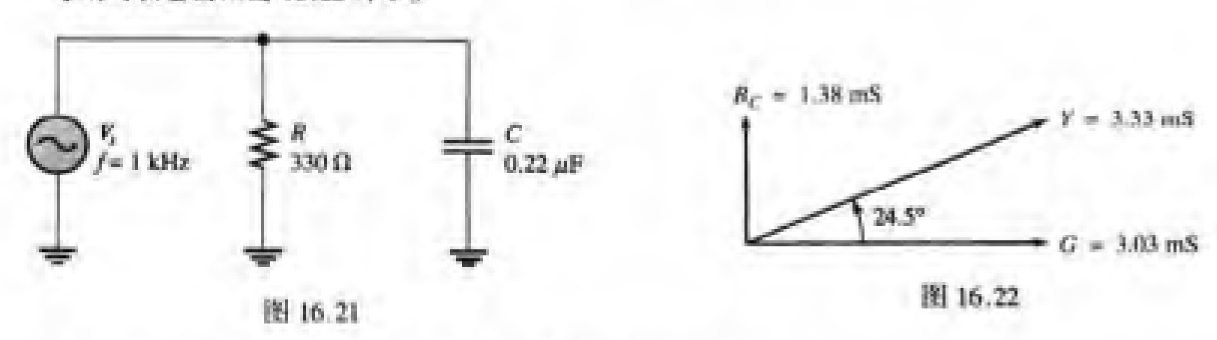


图 16.21

图 16.22

练习：计算图16.21所示电路的总导纳，假设频率增加到2.5 kHz。

16.4 节练习

1. 试写出电导、电容电纳和导纳的定义。
2. 如果 $Z = 100\ \Omega$，试求 Y。
3. 在一个确定的并联 RC 电路中，$R = 47\ \Omega$，$X_C = 75\ \Omega$，试求 $\mathbf{Y}$。
4. 在第3题中，其他条件相同，求阻抗的值是多少？

16.5 并联 *RC* 电路的分析

在前一节中，我们学习了描述并联 RC 电路的阻抗的方法。现在，我们将用欧姆定律和基尔霍夫电流定律对并联 RC 电路进行分析。在并联 RC 电路中，电压和电流的关系是可查的。

学完本节后，读者应该能够：

- 分析并联 RC 电路
- 用欧姆定律和基尔霍夫电流定律分析并联 RC 电路
- 用相量表示电压和电流
- 说明阻抗值和相角随频率而变化的规律
- 将并联电路转化为等效串联电路

为方便起见，在使用欧姆定律分析并联电路时，可以根据关系 $Y = 1/Z$，用导纳表示阻抗。注意，黑体字母表示相量。

$$V = \frac{I}{Y} \qquad (16.21)$$

$$I = VY \qquad (16.22)$$

$$Y = \frac{I}{V} \qquad (16.23)$$

例 16.7　求图 16.23 所示电路的总电流和相角，并画出表示 V_s 和 I_{tot} 关系的相量图。

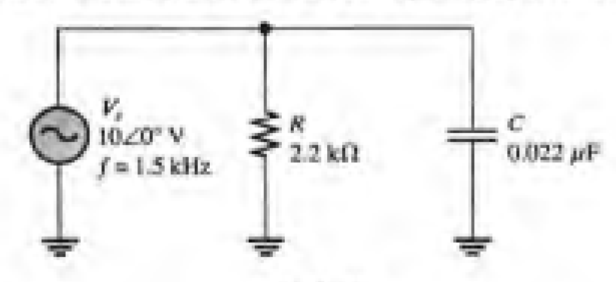


图 16.23

解： 电容电抗为：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1.5\ \text{kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 4.82\ \text{k}\Omega$$

电容电纳为：

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{4.82\ \text{k}\Omega} = 207\ \mu\text{S}$$

电导值为：

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{2.2\ \text{k}\Omega} = 455\ \mu\text{S}$$

总导纳为：

$$\boldsymbol{Y}_{tot} = G + jB_C = 455\ \mu\text{S} + j207\ \mu\text{S}$$

导纳的极坐标形式为：

$$\boldsymbol{Y}_{tot} = \sqrt{G^2 + B_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{B_C}{G}\right)$$

$$= \sqrt{(455\ \mu\text{S})^2 + (207\ \mu\text{S})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{207\ \mu\text{S}}{455\ \mu\text{S}}\right) = 500\angle 24.5°\ \mu\text{S}$$

相角为 24.5°。

用欧姆定律求得总电流为：

$$\boldsymbol{I}_{tot} = \boldsymbol{V}_s\boldsymbol{Y}_{tot} = (10\angle 0°\ \text{V})(500\angle 24.5°\ \mu\text{S}) = \mathbf{5.00\angle 24.5°\ mA}$$

总电流为 5.00 mA，并超前输入电压 **24.5°**，相量图如图 16.24 所示。

I_{tot} = 5.00 mA

24.5°

V_s = 10 V

图 16.24

练习： 如果频率增大一倍，电路的总电流（极坐标形式）是多少？

16.5.1　电流与电压的相位关系

图 16.25(a)显示了并联 RC 电路中所有的电流。总电流 I_{tot} 在节点处分成两条支流 I_R 和 I_C。输入电压 V_s 跨接于电阻和电容并联电路的两端，因此，V_s、V_R 和 V_C 同相，并且大小相等。图 16.25(a)中所有的电流方向都是瞬时的。电源电压反向时，所有电流势必反向。

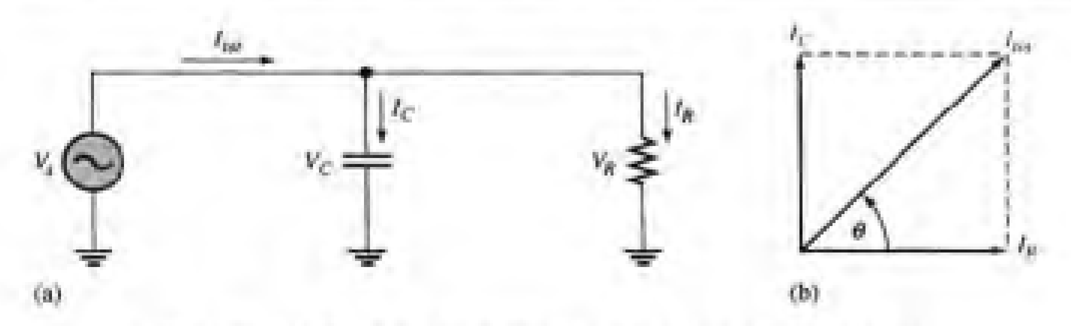


图 16.25 并联 RC 电路的电流图(a)中的电流方向为瞬时的,当然如果电源电压改变方向,电流方向也跟着发生变化

流过电阻的电流与电阻上的电压同相。流过电容的电流超前于电容两端的电压 90°,因此,该电流也超前于流过电阻的电流 90°。根据基尔霍夫电流定律,总电流等于两条支路电流的相量和。用相量图 16.25(b)表示。总电流可表示为:

$$\boldsymbol{I}_{tot} = \boldsymbol{I}_R + j\boldsymbol{I}_C \tag{16.24}$$

这个等式也可用极坐标形式表示为:

$$\boldsymbol{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{I_C}{I_R}\right) \tag{16.25}$$

电路中总电流的大小为:

$$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \tag{16.26}$$

电阻电流和总电流之间的相位差为:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{I_C}{I_R}\right) \tag{16.27}$$

因为电阻电流和输入电压同相,所以同样可以描述总电流和输入电源电压之间的相位差角。电压和电流之间的相位关系如图 16.26 所示。

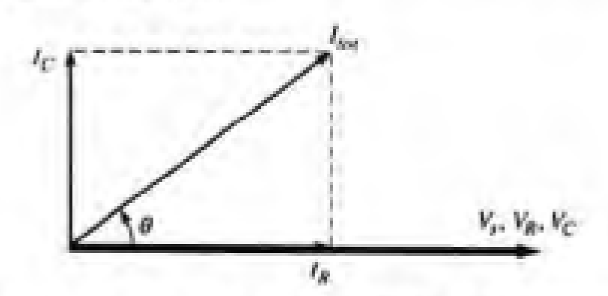


图 16.26 并联 RC 电路中电流与电压相量图(振幅不限)

例 16.8 试确定图 16.27 所示电路中每个电流的值,并描述各电流与输入电压之间的相位关系,画出相量图。

解: 电阻电流、电容电流和总电流分别为:

$$\boldsymbol{I}_R = \frac{\boldsymbol{V}_s}{\boldsymbol{R}} = \frac{12\angle0^\circ\ \text{V}}{220\angle0^\circ\ \Omega} = \mathbf{54.5\angle0^\circ\ mA}$$

$$\boldsymbol{I}_C = \frac{\boldsymbol{V}_s}{\boldsymbol{X}_C} = \frac{12\angle0^\circ\ \text{V}}{150\angle-90^\circ\ \Omega} = \mathbf{80\angle90^\circ\ mA}$$

$$\boldsymbol{I}_{tot} = I_R + jI_C = 54.5\ \text{mA} + j80\ \text{mA}$$

将 I_{tot} 转化为极坐标形式：

$$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}\angle \tan^{-1}\left(\frac{I_C}{I_R}\right)$$

$$= \sqrt{(54.5\ \text{mA})^2 + (80\ \text{mA})^2}\angle \tan^{-1}\left(\frac{80\ \text{mA}}{54.5\ \text{mA}}\right) = \mathbf{96.8\angle 55.7^\circ\ mA}$$

上述结果表明，电阻电流与输入电压同相，较值大小为 54.5 mA；电容电流为 80 mA，超前于输入电压 90°；总电流为 96.8 mA，超前于输入电压 55.7°。上述相量关系如图 16.28 所示。

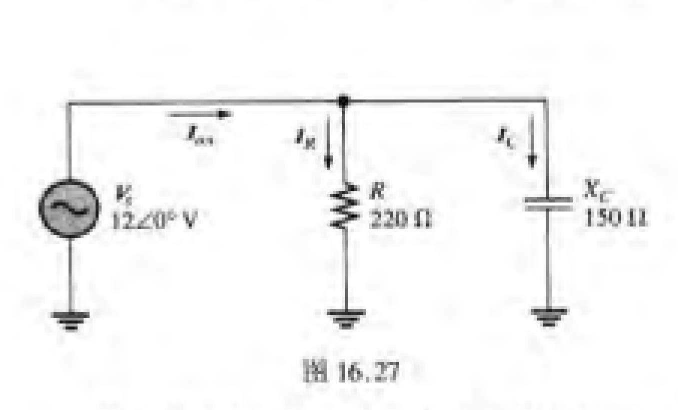


图 16.27

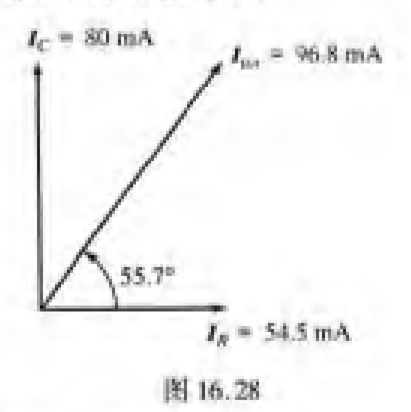


图 16.28

练习：在一个并联 RC 电路中，$I_R = 100\angle 0^\circ$ mA，$I_C = 60\angle 90^\circ$ mA。求总电流。

16.5.2　并联电路与串联电路的转换

对于任意一个并联 RC 电路，都存在一个等效的串联 RC 电路与其对应。所谓等效，是指从这两个电路两端看进去的阻抗相同时，可认为这两个电路是等效的。也就是等效电路一定具有完全相同的阻抗值和阻抗角。

要将一个给定的并联 RC 电路转换为等效的串联 RC 电路，首先要确定并联 RC 电路的阻抗值和阻抗角。然后，用得到的阻抗值 Z 和阻抗角 θ 构造一个阻抗三角形，如图 16.29 所示。在这个阻抗三角形中，两条直角边是串联电路的等效电阻和电容电抗。运用下面的关系式，可以方便地求出具体数值。

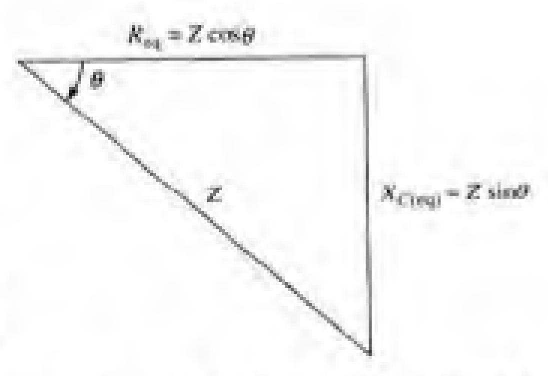


图 16.29　用于 RC 电路等效中，并联转换的阻抗三角形 Z 和 θ 是并联电路的已知值，R_{eq} 和 $X_{C(eq)}$ 是串联电路的值

$$R_{eq} = Z\cos\theta \tag{16.28}$$

$$X_{C(eq)} = Z\sin\theta \tag{16.29}$$

例 16.9　将图 16.30 所示的并联电路转换为等效的串联电路。

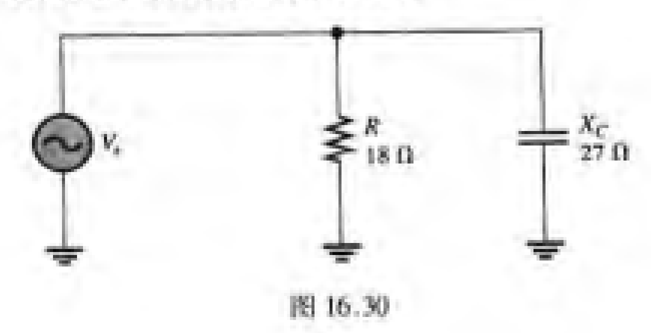


图 16.30

解:首先,确定并联电路的导纳值:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{18\ \Omega} = 55.6\ \text{mS}$$

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{27\ \Omega} = 37.0\ \text{mS}$$

$$\mathbf{Y} = G + jB_C = 55.6\ \text{mS} + j37.0\ \text{mS}$$

将其转换为极坐标形式:

$$\mathbf{Y} = \sqrt{G^2 + B_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{B_C}{G}\right)$$

$$= \sqrt{(55.6\ \text{mS})^2 + (37.0\ \text{mS})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{37.0\ \text{mS}}{55.6\ \text{mS}}\right) = 66.8\angle 33.6°\ \text{mS}$$

所以,阻抗为:

$$\mathbf{Z}_{tot} = \frac{1}{\mathbf{Y}} = \frac{1}{66.8\angle 33.6°\ \text{mS}} = 15.0\angle -33.6°\ \Omega$$

转换为直角坐标形式:

$$\mathbf{Z}_{tot} = Z\cos\theta - jZ\sin\theta = R_{eq} - jX_{C(eq)}$$
$$= 15.0\cos(-33.6°) - j15.0\sin(-33.6°) = 12.5\ \Omega - j8.31\ \Omega$$

等效的串联 RC 电路由 12.5 Ω 的电阻和 8.31 Ω 的电容抗串联而成,如图 16.31 所示。

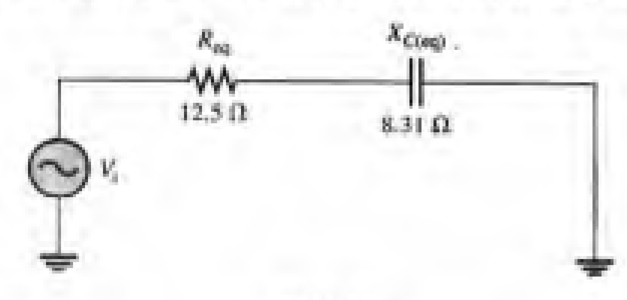


图 16.31

练习:一个并联 RC 电路的阻抗为 $\mathbf{Z} = 10\angle -26°\ \text{k}\Omega$,将其转换为等效的串联 RC 电路。

16.5 节练习

1. 一个 RC 电路的导纳为 3.50 mS,输入电压为 6 V,求总电流为多少?
2. 在某并联 RC 电路中,已知电阻电流为 10 mA,电容电流为 15 mA。求总电流的大小和相位。这个相位是相对于哪一项的?
3. 在并联 RC 电路中,电容电流与输入电压之间的相位差是多少?

第三部分:串-并联电抗电路

16.6 串-并联 RC 电路的分析

在本节中,对于既有 RC 串联,又有 RC 并联的混联电路的分析,仍然采用前面分析分立的 RC 串联和 RC 并联的方法。

学完本节后,读者应该能够:

- 分析串-并联 RC 电路

- 确定总阻抗
- 计算电流和电压
- 测量阻抗和阻抗角

串－并联电路是由多个串联和并联元件组成的电路。下面两个例子将说明应该如何分析 RC 串－并联电路。

例 16.10 在图 16.32 所示的电路中，求解下列问题：

(a) 总阻抗　(b) 总电流　(c) I_{tot} 超前于 V_s 的相位差

解：(a) 首先，计算电容的电抗值：

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(5\ \text{kHz})(0.1\ \mu\text{F})} = 318\ \Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(5\ \text{kHz})(0.047\ \mu\text{F})} = 677\ \Omega$$

一种做法是先分别求出串联部分和并联部分的阻抗，然后将其合并，以得到总阻抗。由 R_1 和 C_1 组成的串联电路的阻抗为：

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = 1.0\ \text{k}\Omega - j318\ \Omega$$

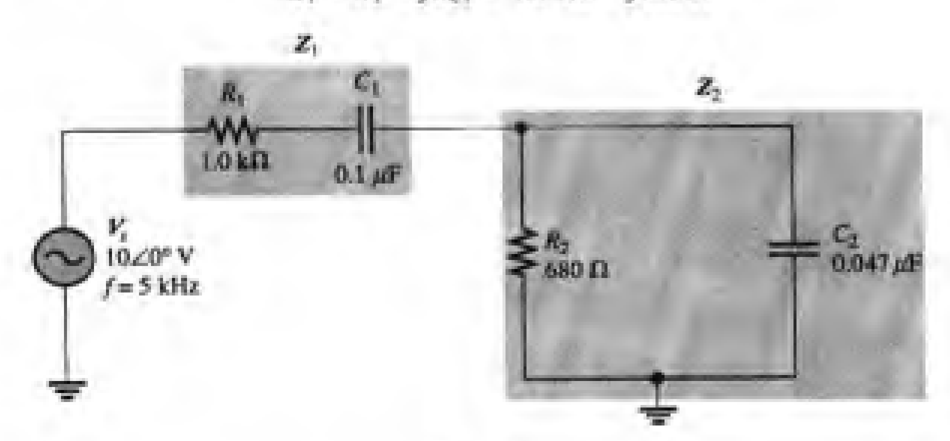


图 16.32

要确定并联部分的阻抗，先求由 R_2 和 C_2 构成的并联电路的电导：

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{680\ \Omega} = 1.47\ \text{mS}$$

$$B_{C2} = \frac{1}{X_{C2}} = \frac{1}{677\ \Omega} = 1.48\ \text{mS}$$

$$\mathbf{Y}_2 = G_2 + jB_{C2} = 1.47\ \text{mS} + j1.48\ \text{mS}$$

将其转换为极坐标形式：

$$\mathbf{Y}_2 = \sqrt{G_2^2 + B_{C2}^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{B_{C2}}{G_2}\right)$$

$$= \sqrt{(1.47\ \text{mS})^2 + (1.48\ \text{mS})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.48\ \text{mS}}{1.47\ \text{mS}}\right) = 2.09\angle 45.2^\circ\ \text{mS}$$

所以，并联部分的阻抗为：

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{1}{\mathbf{Y}_2} = \frac{1}{2.09\angle 45.2^\circ\ \text{mS}} = 478\angle -45.2^\circ\ \Omega$$

将其转换为直角坐标形式：

$$\begin{aligned}\mathbf{Z}_2 &= Z_2\cos\theta - jZ_2\sin\theta \\ &= (478\ \Omega)\cos(-45.2^\circ) - j(478\ \Omega)\sin(-45.2^\circ) = 338\ \Omega - j339\ \Omega\end{aligned}$$

串联部分与并联部分再串联，即结合 $\mathbf{Z}_1$ 和 $\mathbf{Z}_2$ 得到总阻抗为：

$$\begin{aligned}\mathbf{Z}_{tot} &= \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 \\ &= (1.0\ \text{k}\Omega - j318\ \Omega) + (338\ \Omega - j339\ \Omega) = 1338\ \Omega - j657\ \Omega\end{aligned}$$

用极坐标形式表示为：

$$\begin{aligned}\mathbf{Z}_{tot} &= \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \\ &= \sqrt{(1338\ \Omega)^2 + (657\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{657\ \Omega}{1338\ \Omega}\right) = \mathbf{1.49\angle -26.2^\circ\ k\Omega}\end{aligned}$$

(b) 根据欧姆定律求总电流：

$$\mathbf{I}_{tot} = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_{tot}} = \frac{10\angle 0^\circ\ \text{V}}{1.49\angle -26.2^\circ\ \text{k}\Omega} = \mathbf{6.71\angle 26.2^\circ\ mA}$$

(c) 总电流超前输入电压 **26.2°**。

练习：求跨接于 $\mathbf{Z}_1$ 和 $\mathbf{Z}_2$ 两端的电压，并用极坐标形式表示。

例 16.11 求图 16.33 中的所有电流，并画出电流的相量图。

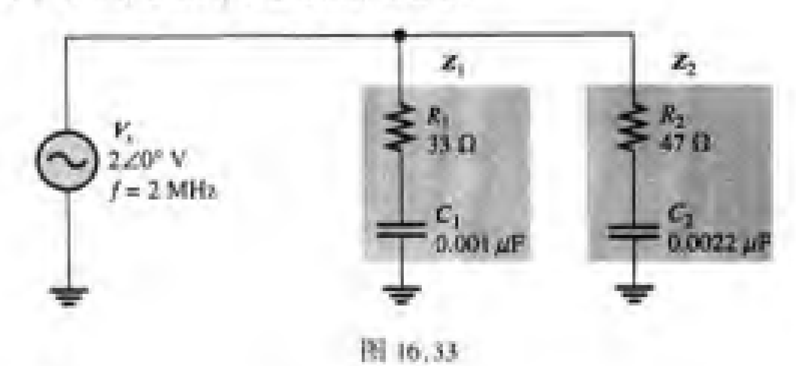


图 16.33

解：先计算 X_{C1} 和 X_{C2}：

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(2\ \text{MHz})(0.001\ \mu\text{F})} = 79.6\ \Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(2\ \text{MHz})(0.0022\ \mu\text{F})} = 36.2\ \Omega$$

然后，分别求两个并联支路的阻抗：

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = 33\ \Omega - j79.6\ \Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = R_2 - jX_{C2} = 47\ \Omega - j36.2\ \Omega$$

将其转换为极坐标形式：

$$\begin{aligned}\mathbf{Z}_1 &= \sqrt{R_1^2 + X_{C1}^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_{C1}}{R_1}\right) \\ &= \sqrt{(33\ \Omega)^2 + (79.6\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{79.6\ \Omega}{33\ \Omega}\right) = 86.2\angle -67.5^\circ\ \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{Z}_2 &= \sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_{C2}}{R_2}\right) \\ &= \sqrt{(47\ \Omega)^2 + (36.2\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{36.2\ \Omega}{47\ \Omega}\right) = 59.3\angle -37.6^\circ\ \Omega\end{aligned}$$

计算每个支路电流：

$$I_1 = \frac{V_s}{Z_1} = \frac{2\angle 0° \text{ V}}{86.2\angle -67.5° \ \Omega} = \mathbf{23.2\angle 67.5° \ mA}$$

$$I_2 = \frac{V_s}{Z_2} = \frac{2\angle 0° \text{ V}}{59.3\angle -37.6° \ \Omega} = \mathbf{33.7\angle 37.6° \ mA}$$

为了便于得到总电流，可将各支路电流表示为直角坐标形式，然后相加：

$$I_1 = 8.89 \text{ mA} + j21.4 \text{ mA}$$
$$I_2 = 26.7 \text{ mA} + j20.6 \text{ mA}$$

总电流为：

$$I_{tot} = I_1 + I_2$$
$$= (8.89 \text{ mA} + j21.4 \text{ mA}) + (26.7 \text{ mA} + j20.6 \text{ mA}) = 35.6 \text{ mA} + j42.0 \text{ mA}$$

将 I_{tot} 表示为极坐标形式：

$$I_{tot} = \sqrt{(35.6 \text{ mA})^2 + (42.0 \text{ mA})^2}\angle \tan^{-1}\left(\frac{42.0 \ \Omega}{35.6 \ \Omega}\right) = \mathbf{55.1\angle 49.7° \ mA}$$

电流相量图如图 16.34 所示。

练习：求图 16.33 所示电路中每个元件上的电压，并画出电压相量图。

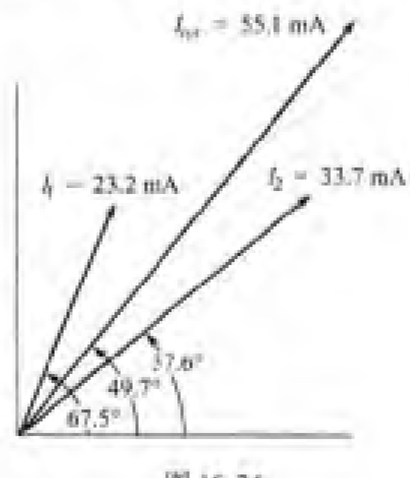


图 16.34

16.6.1 总阻抗的测量

现在，我们要利用测量的方法，确定例 16.10 中电路的总阻抗 Z_{tot} 的值。首先，按以下步骤进行测量，测量方法如图 16.35 所示(其他方法也可行)。

第一步：接入正弦信号源，设置信号源的输出电压值为已知值(10 V)，输出电压的频率为 5 kHz。如果所接的信号源本身的显示不够准确，可以使用伏特表检测输出电压值，而用频率计检测输出电压的频率。

第二步：按图 16.35 所示接入交流电流表，测量总电流。

第三步：根据欧姆定律计算总阻抗。

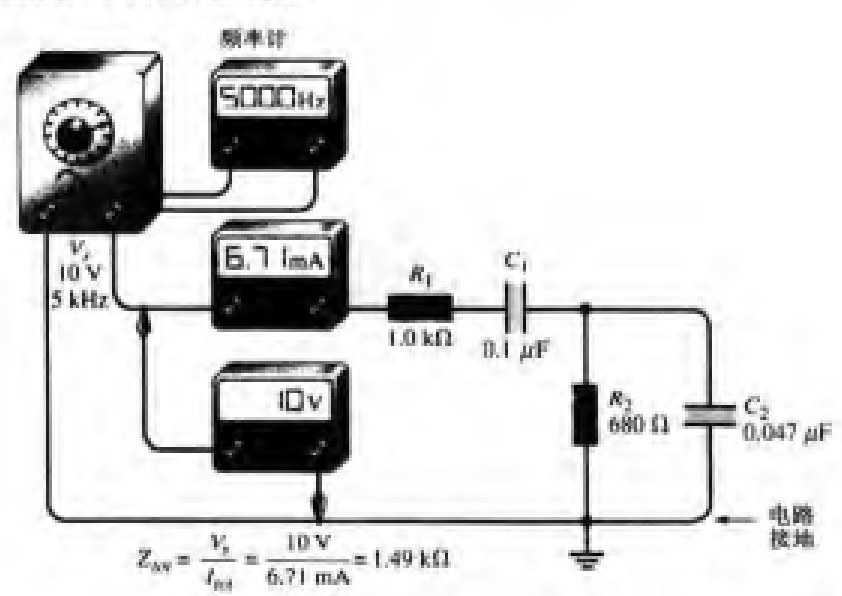


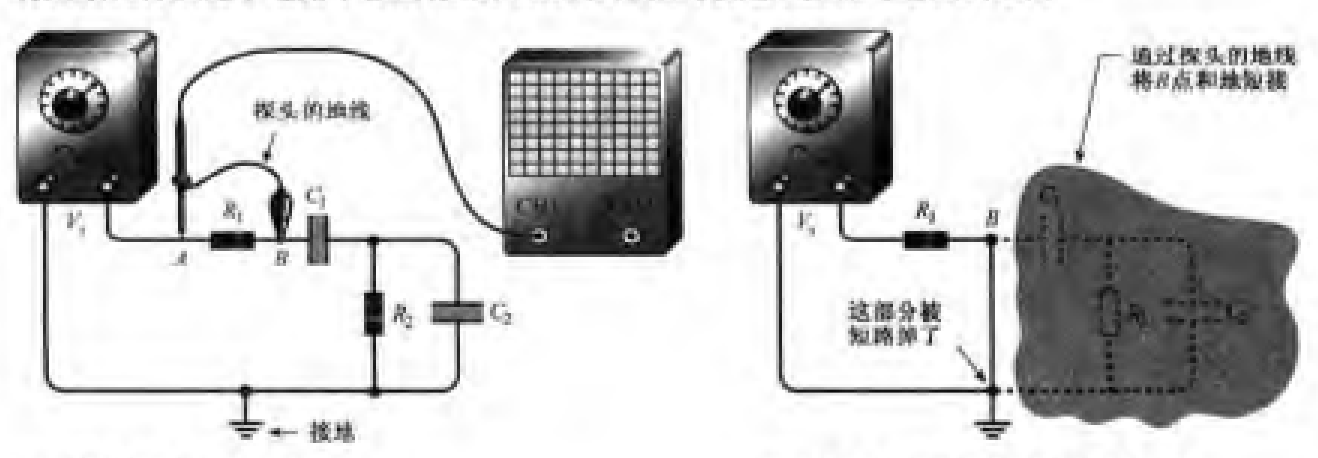
图 16.35 通过测量 V_s 和 I_{tot} 来确定 Z_{tot}

16.6.2 阻抗角 θ 的测量

为了测量阻抗角,需要将输入电压和总电流相对于时间的曲线显示在示波器的屏幕上。可以利用示波器的两个普通探头(即电压探头和电流探头)将这两个量引入示波器。虽然电流探头用于测量电流最为合适,但是与电压探头相比,通常不容易获得。因此,我们仅用电压探头连接示波器来进行相位测量。一台标准示波器的电压探头有两个探针:一个用于接被测信号,是信号端;另一个用于接地,是地线。因此,所有电压的测量必须以地为参考。

由于只有电压探头可以使用,所以总电流不能直接测量。然而在测量相位时,R_1 上的电压与总电流同相,因此,可认为 R_1 上电压的相位是被测总电流的相位。

在进行实际的相位测量之前,有一个问题需要注意,那就是 V_{R1} 的表示。如果将示波器探头跨接在电阻两端,如图 16.36(a)所示,示波器探头的地线会将 B 点与地短接,产生的旁路相当于将其余元件从这个电路中移出,如图 16.36(b)所示(假定示波器与电源共地)。

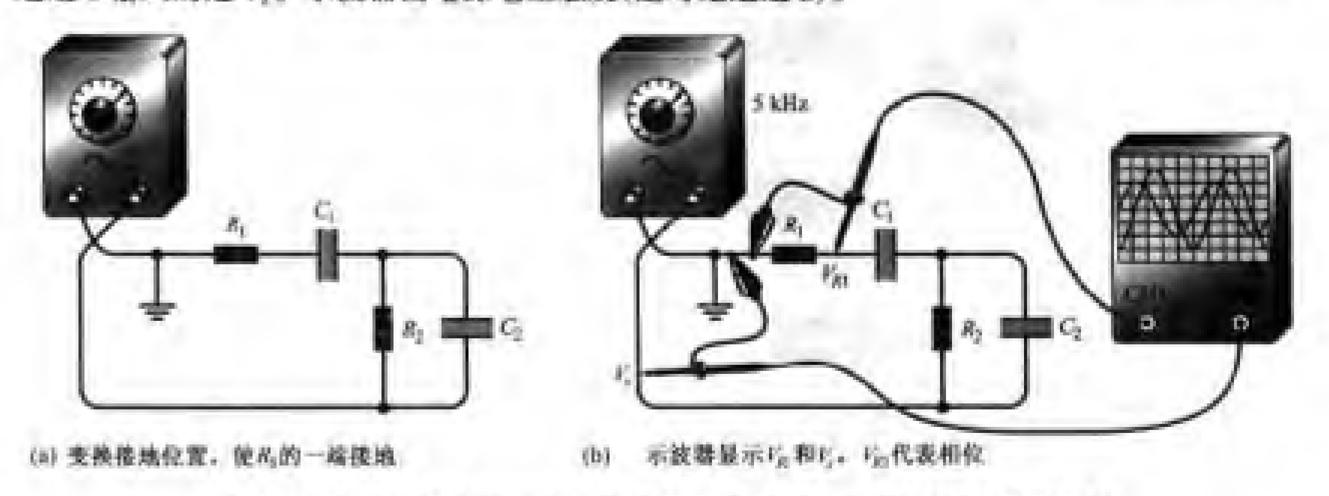


(a) 示波器的地线使B点接地

(b) B点接地的结果使电路的其余部分短路

图 16.36 仪器与电路共地时,直接测量元件两端电压的结果

为了避开这个问题,可以将信号源的接地端与 R_1 的一端相连,如图 16.37(a)所示。这样,示波器的一个探头就可以跨接在电阻 R_1 的两端,以测量其电压 V_{R1},如图 16.37(b)所示。示波器的另一个探头跨接在电压源的两端,以测量其电压 V_s。现在,示波器的通道 1 输入的是 V_{R1},通道 2 输入的是 V_s。示波器由电源电压触发(这时是通道 2)。



(a) 变换接地位置,使R_1的一端接地

(b) 示波器显示V_{R1}和V_s,V_{R1}代表相位

图 16.37 变换接地位置,避免电路的其余部分短路,以实现直接的电压测量

在将探头接入电路之前，应该调节示波器，使两条水平线（基线）成为一条穿过示波器屏幕中心的直线。然后，将探头的信号端接地，调节垂直旋钮，使基线移向屏幕中线，并与其重合。

一旦波形稳定地显示在示波器屏幕上，就可以测量电源电压的周期。随后，用电压/灵敏度控制旋钮调节波形的幅度，使两个电压波形的幅度相同。然后，再用秒/刻度控制旋钮展开波形，使两个电压波形水平分离。两个电压波形之间的水平距离表示时间。两个电压波形之间沿水平方向的刻度数，乘以秒/刻度控制旋钮的设定值，就等于它们之间的时间 Δt。如果示波器有光标，可以用光标确定 Δt。

只要确定了周期 T 和两个电压波形之间的时间 Δt，就可以用下式计算阻抗角。

$$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T}\right)360^\circ \qquad (16.30)$$

一个屏幕显示的例子如图 16.38 所示。图中，两个波形的刻度值为 1.5 格，秒/刻度控制旋钮设定为 10 μs，两个波形的周期为 200 μs，所以 Δt 为：

$$\Delta_t = 1.5\ \text{刻度} \times 10\ \mu s/\text{刻度} = 15\ \mu s$$

阻抗角为：

$$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T}\right)360^\circ = \left(\frac{15\ \mu s}{200\ \mu s}\right)360^\circ = 27^\circ$$

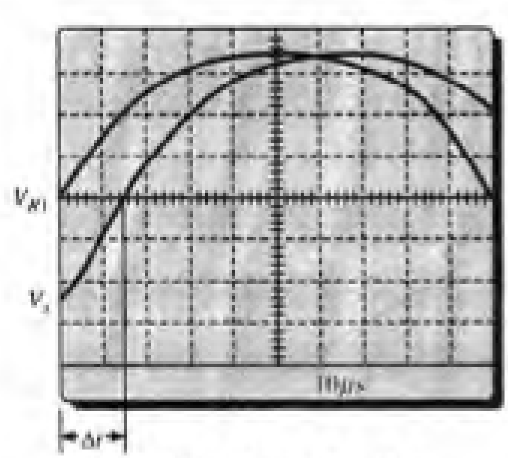


图 16.38 用示波器确定阻抗角

16.16 节练习

1. 对图 16.32 所示的串 - 并联电路，其等效的串联 RC 电路是怎样的？
2. 求图 16.33 所示电路总阻抗的极坐标形式。

第四部分：专题讨论

16.7 RC 电路中的功率

在交流纯电阻电路中，电源输入电路的所有能量都由电阻转化为热能消耗掉。在交流纯电容电路中，在电压周期的某一时段，由电源输入电路的所有能量存储在电容中；而在电压周期的另一时段，这些能量返回电源。在存储和返回的过程中，没有能量转化为热能。电路中既有电阻又有电容时，一部分能量通过电容交替存储和返回，另一部分能量被电阻消耗。输入能量中转化为热能的数量取决于电阻和电容电抗的相对值。

学完本节后，读者应该能够：

- 确定 RC 电路的功率
- 解释有功和无功功率
- 画出功率三角形
- 论述功率因数
- 解释视在功率
- 计算 RC 电路的功率

电阻大于电容电抗时,由电源输入的总能量的大部分经电阻转化为热能,只有少部分存储于电容之中;同样,电抗大于电阻时,总能量中存储和返还的部分大于转换为热能的部分。

有时称电阻上的功率为有功功率(P_{true}),称电容上的功率为无功功率(P_r),计算公式如下。有功功率的单位为瓦特,无功功率的单位为无功的伏安(VAR,volt-ampere reactive)。

$$P_{true} = I^2R \tag{16.31}$$

$$P_r = I^2X_C \tag{16.32}$$

16.7.1 *RC* 电路的功率三角形

将阻抗相量图概括为如图 16.39(a)所示。功率的相量关系也可以用与之相似的图形表示,因为各个功率值 P_{true}和 P_r,与 R 和 X_C 的不同之处在于因子 I^2,如图 16.39(b)所示。

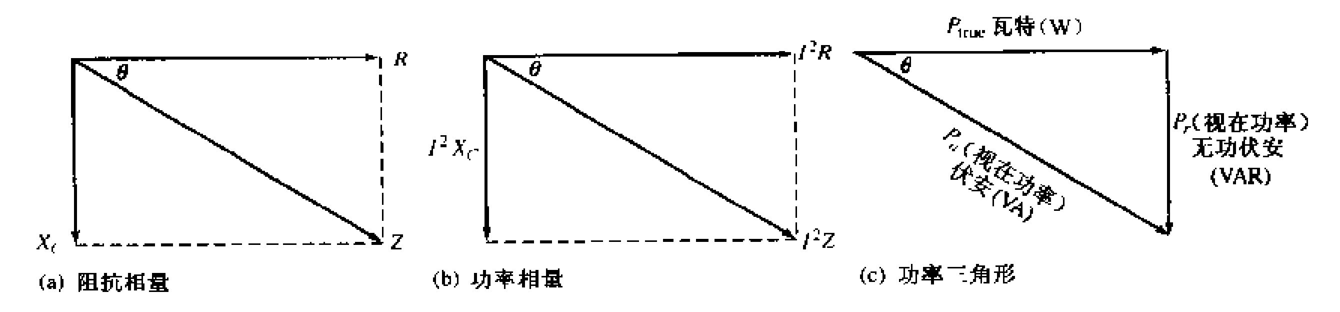


图 16.39 *RC* 电路功率三角形的形成

功率相量的结果 I^2Z,表示为视在功率 P_a。在任何时刻,P_a 都表现为电源与 *RC* 电路之间传输的总功率。视在功率的单位是伏安(VA)。视在功率的表达式为:

$$P_a = I^2Z \tag{16.33}$$

将图 16.39(b)所示的功率相量图重新整理为直角三角形的形式,如图 16.39(c)所示。这个三角形叫做功率三角形。根据三角函数规则,P_{true}可表示为:

$$P_{true} = P_a\cos\theta \tag{16.34}$$

由于 P_a 等于 I^2Z 或 VI,所以 *RC* 电路实际消耗的功率可表示为:

$$P_{true} = VI\cos\theta \tag{16.35}$$

其中,V 是输入电压,I 是总电流。

对于纯电阻电路,$\theta = 0°$,$\cos0° = 1$,因此 P_{true}等于 VI。对于纯电容电路,$\theta = 90°$,$\cos90° = 0$,因此 P_{true}等于零。这正像我们所知道的,理想电容不消耗功率。

16.7.2 功率因数

函数 $\cos\theta$ 称为功率因数,表示为:

$$PF = \cos\theta \tag{16.36}$$

随着输入电压与总电流之间相位差的增加,功率因数减小,表明电抗电流增加。较小的功率因数对应较小的功率消耗。

功率因数可以从纯电抗电路的功率因数为 0 变为纯电阻电路的功率因数为 1。在 *RC* 电路中,功率因数称为超前功率因数,因为电路中的电流超前于电压。

例 16.12　求图 16.40 所示电路的功率因数和有功功率。

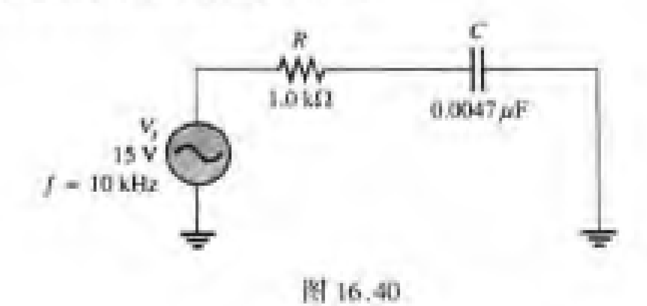


图 16.40

解：电容电抗为：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(10\ \text{kHz})(0.0047\ \mu\text{F})} = 3.39\ \text{k}\Omega$$

电路的总阻抗的直角坐标形式为：

$$\mathbf{Z} = R - jX_C = 1.0\ \text{k}\Omega - j3.39\ \text{k}\Omega$$

将其转换为极坐标形式：

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(1.0\ \text{k}\Omega)^2 + (3.39\ \text{k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{3.39\ \text{k}\Omega}{1.0\ \text{k}\Omega}\right) = 3.53\angle -73.6^\circ\ \text{k}\Omega$$

与阻抗相关的角是阻抗角，该角又是输入电压与总电流之间的夹角 θ。因此，功率因数为：

$$PF = \cos\theta = \cos(-73.6^\circ) = \mathbf{0.282}$$

电流值为：

$$I = \frac{V_s}{Z} = \frac{15\ \text{V}}{3.53\ \text{k}\Omega} = 4.25\ \text{mA}$$

有功功率为：

$$P_{\text{true}} = V_s I\cos\theta = (15\ \text{V})(4.25\ \text{mA})(0.282) = \mathbf{18.0\ mW}$$

练习：在图 16.40 中，如果频率减少一半，功率因数应为多少？

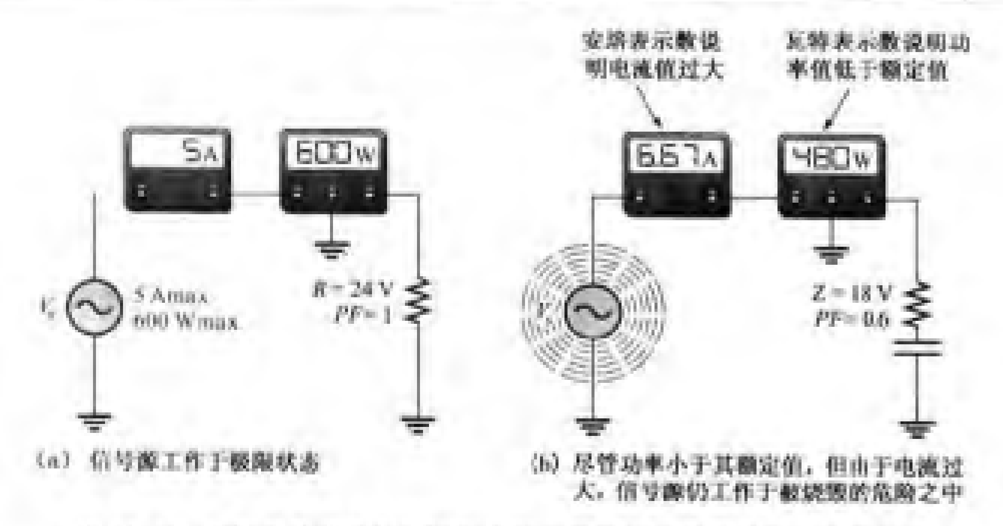
16.7.3　视在功率的意义

前面已经提到过，视在功率是电源与负载之间传递的功率。视在功率由两部分构成：一部分是有功功率，另一部分是无功功率。

在所有的电气和电子系统中，作功的是有功功率。无功功率只是在电源与负载之间的能量交换。理论上，就完成有用功而论，所有传输到负载的功率都应该是有功功率，而与无功功率无关。然而，许多实际情况中的负载都含有电抗，因此必须考虑两种功率成分。

第 15 章已经讨论过与变压器相关的视在功率。对于任何电抗性负载，总电流都由两部分构成：电阻电流和电抗电流。如果仅仅考虑负载中的有功功率，就只是讨论了负载从电源获得的总电流中的一部分。为了得到负载所吸收的实际电流的真实情况，则必须考虑视在功率（VA）。

一个电源，例如交流信号源，为负载提供的电流可以达到某个最大值。如果负载吸收的电流大于这个最大值，电源可能被烧毁。图 16.41(a)显示一个 120 V 的信号源可以为负载提供最大值 5 A 的电流。假设这个信号源的额定功率为 600 W，并且该信号源是为一个阻值为 24 Ω 的纯电阻（功率因数为 1）供电，安培表的读数为 5 A，瓦特表显示功率为 600 W。这时，尽管信号源已经工作于最大电流和极限功率的情况下，但是仍然能够正常工作，不会发生故障。



(a) 信号源工作于极限状态

(b) 尽管功率小于其额定值，但由于电流过大，信号源仍工作于被烧毁的危险之中

图 16.41 工作于负载为电抗情况下的电源额定功率是伏安而不是瓦特

现在，如果将负载变成阻抗为 18 Ω、功率因数为 0.6 的电抗性负载，如图 16.41(b)所示。这时，电流为 120 V/18 Ω = 6.67 A，超出了极限值。尽管瓦特表的读数为 480 W，小于信号源的额定功率值，但是过大的电流仍然会造成危害。这个例子说明，用有功功率表示交流电源的额定值是不合适的。上例中交流信号源的额定功率应该是 600 VA，而不是 600 W。这种额定功率的表示方式也是产品经常使用的。

例 16.13 对图 16.42 所示的电路，求出电路的有功功率、无功功率和视在功率。

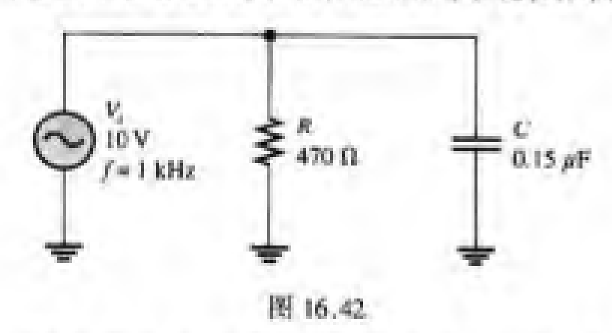


图 16.42

解：由图 16.42 可知，$R = 470\ \Omega$；所以，$G = 1/R = 1/470\ \Omega = 2.13\ \text{mS}$。电容电抗以及通过 R 和 C 的电流分别为：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1000\ \text{Hz})(0.15\ \mu\text{F})} = 1061\ \Omega$$

$$I_R = \frac{V_s}{R} = \frac{10\ \text{V}}{470\ \Omega} = 21.3\ \text{mA}$$

$$I_C = \frac{V_s}{X_C} = \frac{10\ \text{V}}{1061\ \Omega} = 9.43\ \text{mA}$$

有功功率为：

$$P_{true} = I_R^2 R = (21.3\ \text{mA})^2(470\ \Omega) = \mathbf{213\ mW}$$

无功功率为：

$$P_r = I_C^2 X_C = (9.43\ \text{mA})^2(1061\ \Omega) = \mathbf{94.3\ mVAR}$$

视在功率为：

$$P_a = \sqrt{P_{true}^2 + P_r^2} = \sqrt{(213\ \text{mW})^2 + (94.3\ \text{mVAR})^2} = \mathbf{233\ mVA}$$

练习：如果将图 16.42 所示电路的工作频率改为 2 kHz，电路的有功功率为多少？

16.7 节练习

1. 在 *RC* 电路中，哪些元件消耗功率？
2. 若阻抗角 θ 为 45°，功率因数应为多少？
3. 某串联 *RC* 电路有如下参数：$R = 330\ \Omega$，$X_C = 460\ \Omega$，$I = 2\ \text{A}$。求该电路的有功功率、无功功率和视在功率。

16.8 基本应用

RC 电路有各种各样的应用，常作为复杂电路的一部分。本节将讨论两种主要的应用：在移相网络中的应用和在频率选择网络（滤波器）中的应用。

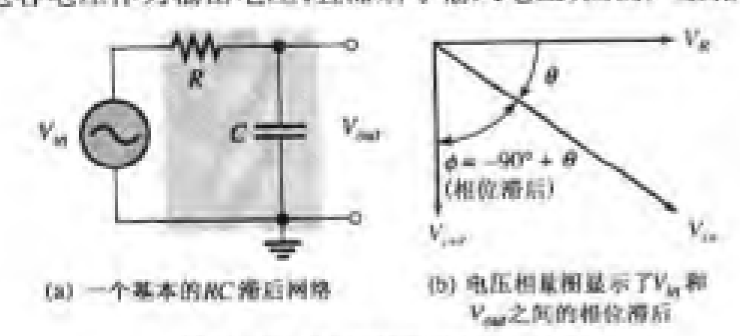
学完本节后，读者应该能够：

- 论述一些基本的 *RC* 电路的应用
- 论述和分析 *RC* 滞后网络
- 论述和分析 *RC* 超前网络
- 论述作为滤波器使用的 *RC* 电路的工作原理

16.8.1 *RC* 滞后网络

RC 滞后网络是一个移相电路，该电路的输出电压滞后于输入电压某一确定的值。图 16.43(a) 显示了一个串联 *RC* 电路，该电路的输出电压取自电容两端。电源为电路提供输入电压 V_{in}。θ 是电流与输入电压之间的相位差，也是电阻上的电压与输入电压之间的相位差，因为 V_R 和 I 彼此同相。

由于 V_C 滞后于 V_R 的角度为 90°，电容上的电压与输入电压之间的相位差等于 $-90° + \theta$，如图 16.43(b) 所示。电容电压作为输出电压，且滞后于输入电压，因而产生相移。



(a) 一个基本的 *RC* 滞后网络　　(b) 电压相量图显示了 V_{in} 和 V_{out} 之间的相位滞后

图 16.43　*RC* 滞后网络（$V_{out} = V_C$）

将滞后网络的输入和输出电压波形显示在示波器上，两个波形的相似关系如图 16.44 所示。输入与输出之间的相位差用 ϕ 表示，其大小取决于电容电抗与电阻的相对大小，就像输出电压的数值取决于电容电抗与电阻的相对大小一样。

输入与输出之间的相位差　前面已经确定，用 θ 表示 I 与 V_{in} 之间的相位差。现在，用 ϕ 表示 V_{in} 和 V_{out} 之间的相位差。ϕ 的大小由以下推导决定。

输入电压与电流的极坐标表示形式分别为 $V_{in}\angle 0°$ 和 $I\angle\theta$，输出电压为：

$$V_{out} = (I\angle\theta)(X_C\angle -90°) = IX_C\angle(-90° + \theta)$$

在此之前，输入电压与输出电压的相位差是 $-90°+\theta$。由于 $\theta=-\tan^{-1}(X_C/R)$，因此，输入电压与输出电压的相位差角为：

$$\phi=-90°+\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) \tag{16.37}$$

这个角度通常为负值，表明输出电压滞后于输入电压，如图 16.45 所示。

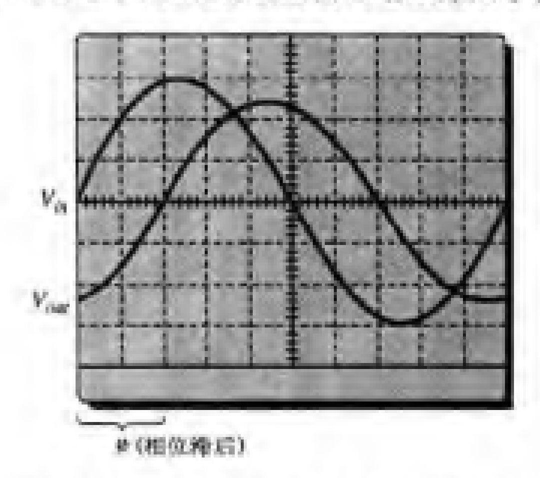
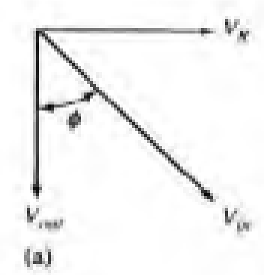


图 16.44 示波器显示了滞后网络输入和输出电压的波形（V_{out} 滞后 V_{in}）



ϕ V_{out} V_{in} V_R

(b)

图 16.45

例 16.14 求图 16.46 所示的每个滞后网络中输入与输出之间的相位差。

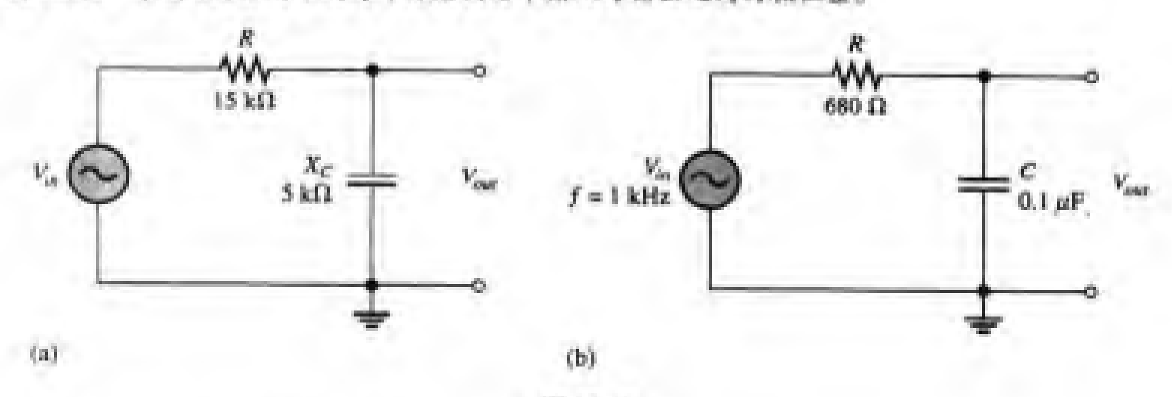


图 16.46

解：在图 16.46(a)所示的滞后网络中，

$$\phi=-90°+\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)=-90°+\tan^{-1}\left(\frac{5\text{ k}\Omega}{15\text{ k}\Omega}\right)=-90°+18.4°=\mathbf{-71.6°}$$

输出滞后于输入 71.6°。

在图 16.46(b)所示的滞后网络中，先求电容的电抗：

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi(1\text{ kHz})(0.1\ \mu\text{F})}=1.59\text{ k}\Omega$$

$$\phi=-90°+\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)=-90°+\tan^{-1}\left(\frac{1.59\text{ k}\Omega}{680\ \Omega}\right)=\mathbf{-23.2°}$$

输出滞后于输入 23.2°。

练习：在一个滞后网络中，如果频率增加，滞后的相位将怎样变化？

输出电压值　由于 RC 滞后网络可以有不同的输出电压，因此这种网络可作为一种分压器。其中，电阻分去了总输入电压中的一部分电压，而电容分去了总输入电压中的另一部分电压。如果电容电压为输出电压，该电压可以用下式计算：

$$V_{out}=\left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2+X_C^2}}\right)V_{in} \tag{16.38}$$

也可以根据欧姆定律计算：

$$V_{out}=IX_C \tag{16.39}$$

RC 滞后网络输出电压的相量表达式为：

$$\mathbf{V}_{out}=V_{out}\angle\phi \tag{16.40}$$

例 16.15　在图 16.46(b)所示的滞后网络中，输入电压的有效值为 10 V，求其输出电压的相量形式。并且，画出反映其相位关系的输入和输出电压的波形。电容的电抗 X_C(1.59 kΩ)和ϕ(−23.2°)源自例 16.14。

解：输出电压的相量形式为：

$$\mathbf{V}_{out}=\left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2+X_C^2}}\right)V_{in}\angle\phi$$
$$=\left(\frac{1.59\text{ k}\Omega}{\sqrt{(680\ \Omega)^2+(1.59\text{ k}\Omega)^2}}\right)10\angle-23.2°\text{ V}=\mathbf{9.20\angle-23.2°\ V\ rms}$$

输入和输出电压的波形如图 16.47 所示。注意，输出电压滞后于输入电压 23.2°。

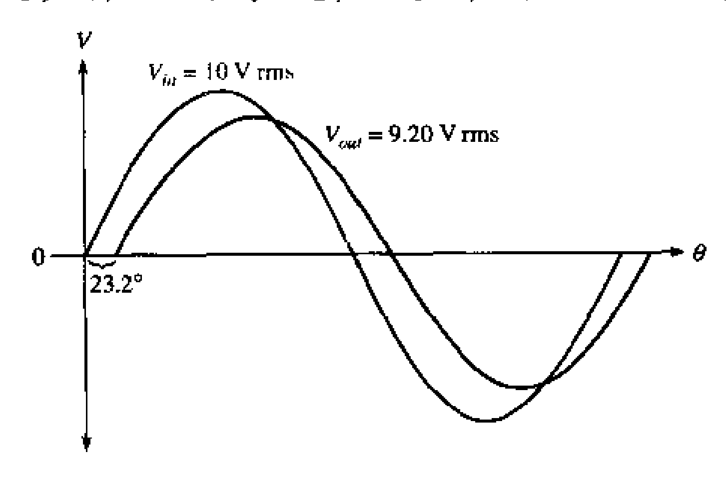


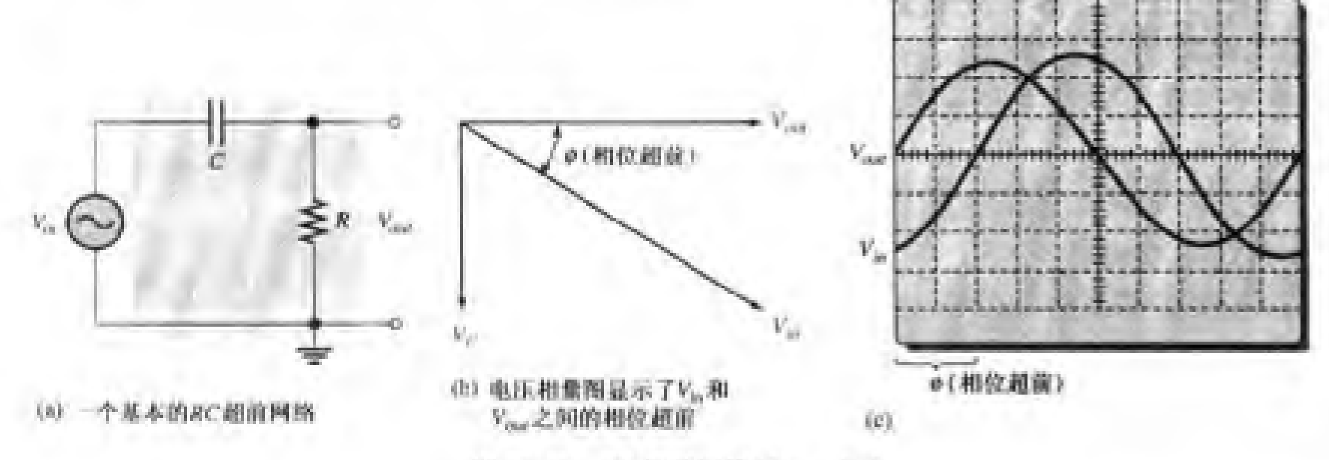
图 16.47

练习：在一个滞后网络中，频率增加时输出电压会有什么变化？

16.8.2 RC 超前网络

RC 超前网络是一个移相电路，该电路的输出电压超前于输入电压某一确定的值。在 RC 串联电路中，如果输出电压取自电阻两端，而不是取自电容两端，如图 16.48(a)所示，这时的 RC 串联电路就是超前网络。

输入与输出间的相位差　已知在 RC 串联电路中电流超前于输入电压，电阻电压与电流同相。由于输出电压取自电阻两端，所以输出超前于输入，用相量图表示，如图 16.48(b)所示。一个典型的用示波器显示的波形如图 16.48(c)所示。



(a) 一个基本的RC超前网络　(b) 电压相量图显示了V_{in}和V_{out}之间的相位超前　(c)

图 16.48　RC 超前网络($V_{out}=V_R$)

与滞后网络相同,超前网络中输入电压与输出电压之间的相位差值以及输出电压值都取决于电阻和电容电抗的相对大小。以输入电压的相位为参考相位 0°,则输出电压的相位为 θ(总电流与电源电压之间的相位差),因为电阻上的输出电压与总电流彼此同相。所以,由这时的$\phi=\theta$ 可得:

$$\phi=\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)\qquad(16.41)$$

由于输出超前于输入,这个相位差值总是正的。下面的例题将说明超前网络中输入与输出之间相位差值的计算方法。

例 16.16　计算图 16.49 中各电路输入与输出之间的相位差。

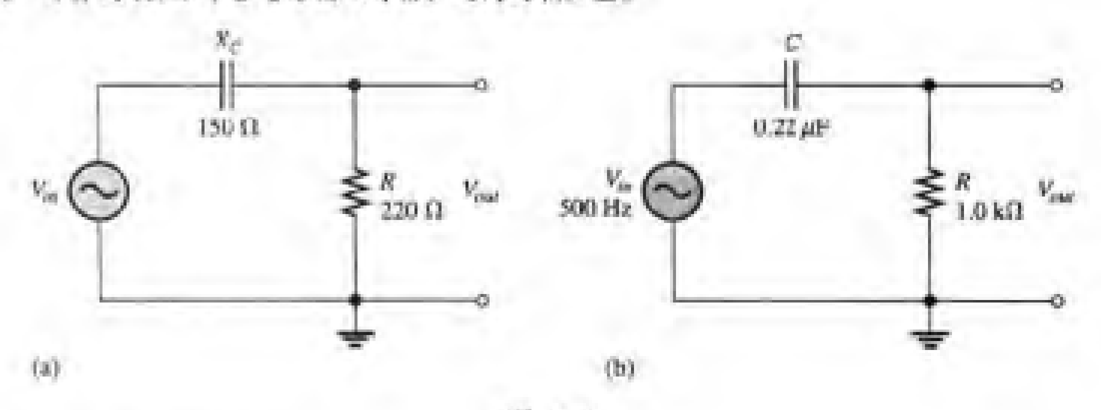


图 16.49

解:对图 16.49(a)中的超前网络,有:

$$\phi=\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)=\tan^{-1}\left(\frac{150\ \Omega}{220\ \Omega}\right)=\mathbf{34.3°}$$

输出超前于输入 34.3°。

对于图 16.49(b)中的超前网络,先求电容电抗:

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi(500\ \text{Hz})(0.22\ \mu\text{F})}=1.45\ \text{k}\Omega$$

$$\phi=\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)=\tan^{-1}\left(\frac{1.45\ \text{k}\Omega}{1.0\ \text{k}\Omega}\right)=\mathbf{55.4°}$$

输出超前于输入 55.4°。

练习:在一个超前网络中,频率增加时超前相位会有什么变化?

输出电压的取值　由于 RC 超前网络的输出电压取自电阻，所以输出电压的计算既可以用分压公式，又可以用欧姆定律。

$$V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in} \tag{16.42}$$

$$V_{out} = IR \tag{16.43}$$

输出电压的相量表达式为：

$$\mathbf{V}_{out} = V_{out}\angle\phi \tag{16.44}$$

例 16.17　在图 16.49(b)中，输入电压的有效值为 10 V。求输出电压的相量形式，画出输入和输出电压的相关波形，并标出其最大值。相位差(55.4°)和 X_C(1.45 kΩ)与例 16.16 中的数据相同。

解：输出电压的相量形式为：

$$\mathbf{V}_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in}\angle\phi = \left(\frac{1.0\ \text{k}\Omega}{1.76\ \text{k}\Omega}\right)10\angle 55.4°\ \text{V} = \mathbf{5.68\angle 55.4°\ V\ rms}$$

输入电压的最大值为：

$$V_{in(p)} = 1.414V_{in(rms)} = 1.414(10\ \text{V}) = 14.14\ \text{V}$$

输出电压的最大值为：

$$V_{out(p)} = 1.414V_{out(rms)} = 1.414(5.68\ \text{V}) = 8.03\ \text{V}$$

波形如图 16.50 所示。

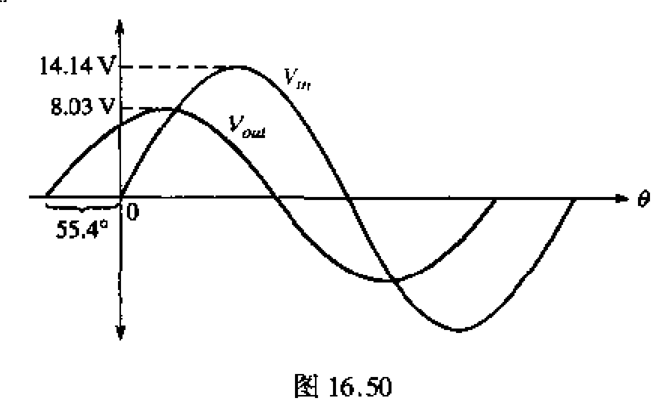


图 16.50

练习：在一个超前网络中，频率减少时输出电压会有什么变化？

16.8.3　用于滤波的 RC 电路

滤波器是频率选择电路，只允许输入信号中的某些频率成分通过，而阻止其他频率成分到达输出端。也就是所有的频率成分中，只有选中的部分经过滤波器到达输出端。有关滤波器的更深入内容可参见第 19 章，这里只是将其作为应用实例进行介绍。

串联 RC 电路表现出了频率选择特性，因而可作为简单的滤波器。这种滤波器有两种类型。第一种是已经分析过的，叫做低通滤波器，取电容两端的电压作为输出以实现滤波，例如滞后网络。第二种叫做高通滤波器，取电阻两端的电压作为输出进行滤波，例如超前网络。

低通滤波器　在滞后网络中，已经对其输出值的大小和相移有所介绍。就具有的滤波作用而论，我们首先感兴趣的是其输出值的大小随频率而变化的性质。

为了进一步说明 RC 串联电路的滤波作用，我们选取一些特殊信号作为输入，如图 16.51 所示。在图 16.51(a)中，输入电压频率为零(直流)。由于电容具有隔直性，R 上没有压降，所以输出电压完全等于输入电压。在这种情况下，电路允许所有的输入信号输出(10 V 输入，10 V 输出)。

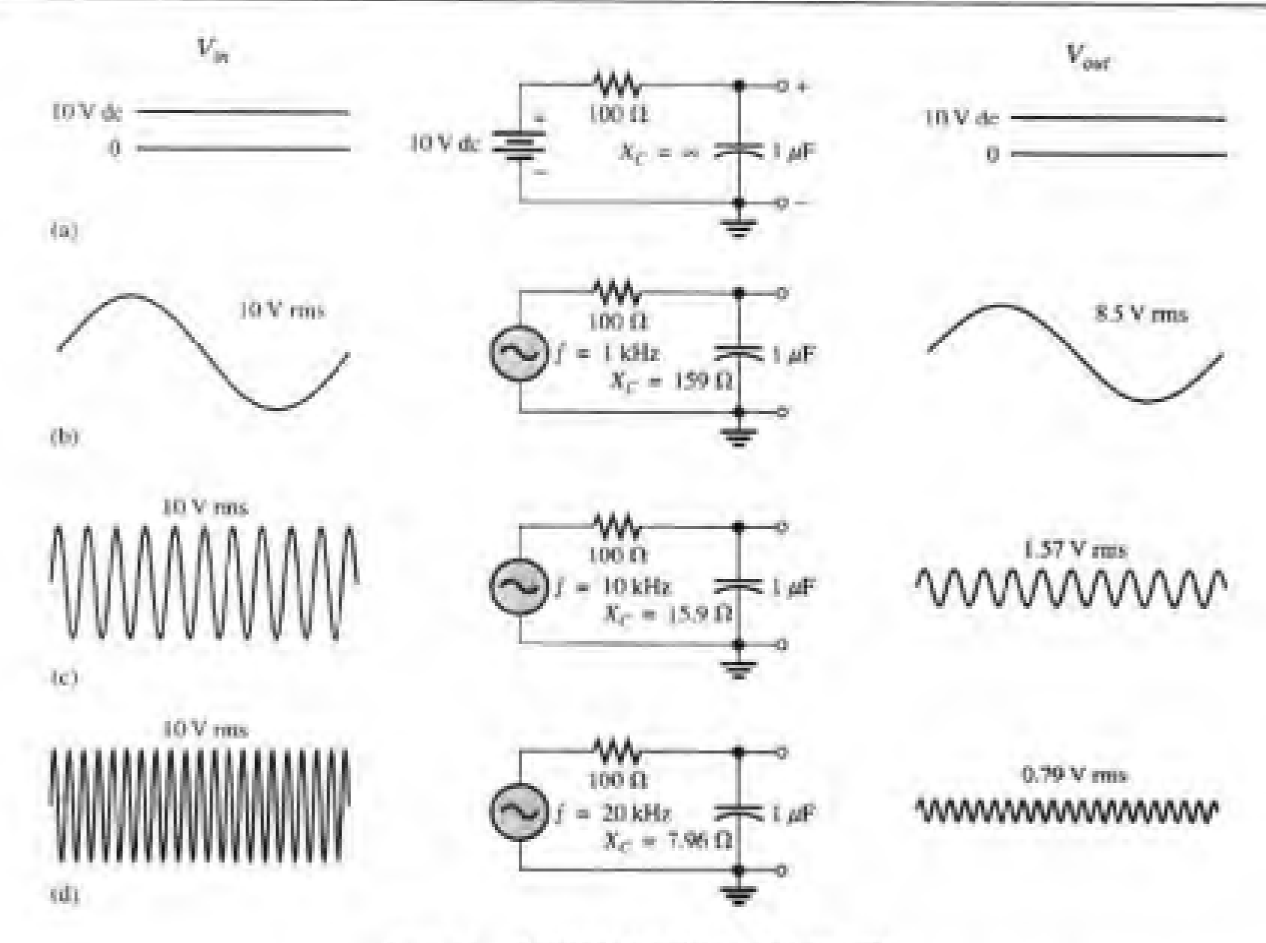


图 16.51 低通滤波器的作用(不考虑相移)

在图 16.51(b)中,输入电压频率增加到 1 kHz 时,电容电抗降低为 159 Ω。对于有效值为 10 V 的输入电压,根据分压公式或欧姆定律,输出电压的有效值近似为 8.5 V。

在图 16.51(c)中,输入电压频率增加到 10 kHz 时,电容电抗降低为 15.9 Ω。对于有效值为 10 V 的输入电压,输出电压的有效值近似为 1.57 V。

输入电压频率进一步增加时,输出电压继续减小,直到输入电压频率增加得非常高时,输出电压为零,如图 16.51(d)所示。

电路的上述作用描述如下:随着输入频率的增加,电容电抗减小。由于电阻不变而电容电抗减小,根据分压原理,电容两端的电压(输出电压)将随之减小。当输入频率增加到某一个值时,电抗远小于电阻,输出电压与输入电压相比可以忽略不计。这时,电路基本上完全阻止了输入信号的输出。

如图 16.51 所示,电路允许直流完全通过。随着输入频率的增加,只有一少部分的输入电压通过电路到达输出端。也就是随着输入频率的增加,输出电压减小。表现为低频信号比高频信号更容易通过电路。因此,这种 *RC* 电路是一种最简单的低通滤波器。

图 16.51 中的低通滤波器电路的频率响应如图 16.52 所示。图中的曲线表示了一组输出电压值与频率的关系,这条曲线叫做响应曲线。从响应曲线可以看出,随着输入频率的增加,输出电压减小。

高通滤波器 高通滤波器的作用如图 16.53 所示。图中输出电压取自电阻两端,就像超前网络一样。输入电压是直流(频率为零)时,如图 16.53(a)所示,由于电容的隔直性,*R* 上没有压降,使输出电压为零伏。

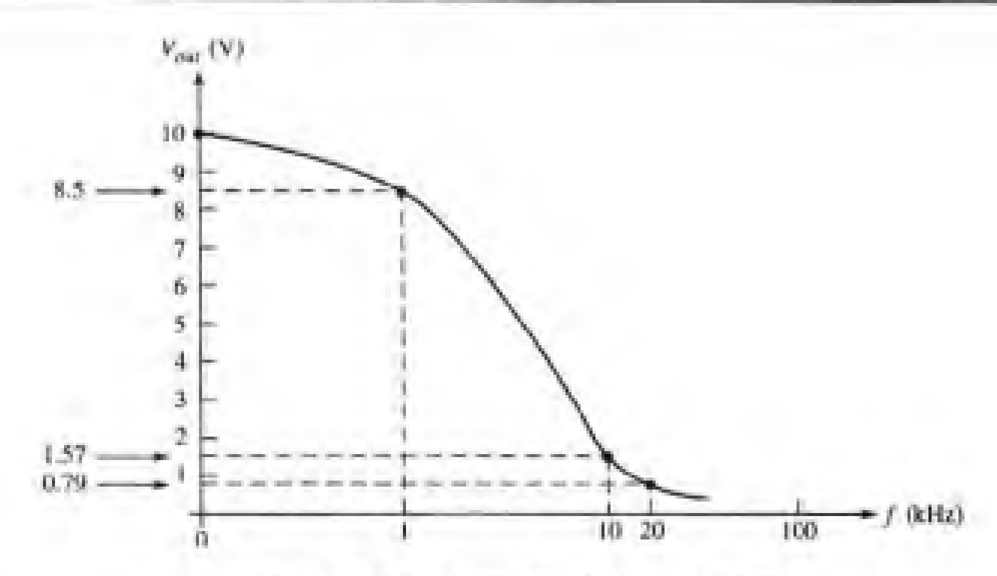


图 16.52　图 16.51 中低通滤波器频率响应曲线

在图 16.53(b)中，输入电压的有效值为 10 V，频率增加到 100 Hz 时输出电压的有效值为 0.63 V。这样，输入电压中只有较小的部分到达输出端。

在图 16.53(c)中，频率进一步增加到 1 kHz 时，由于电容电抗进一步降低，使得电阻两端的压降增大。这时，输出电压的有效值为 5.32 V。可见，随着频率的增加，输出电压增加。当频率增加到某一数值时，电抗与电阻相比可忽略不计，输入电压几乎全部降落到电阻上，如图 16.53(d)所示。

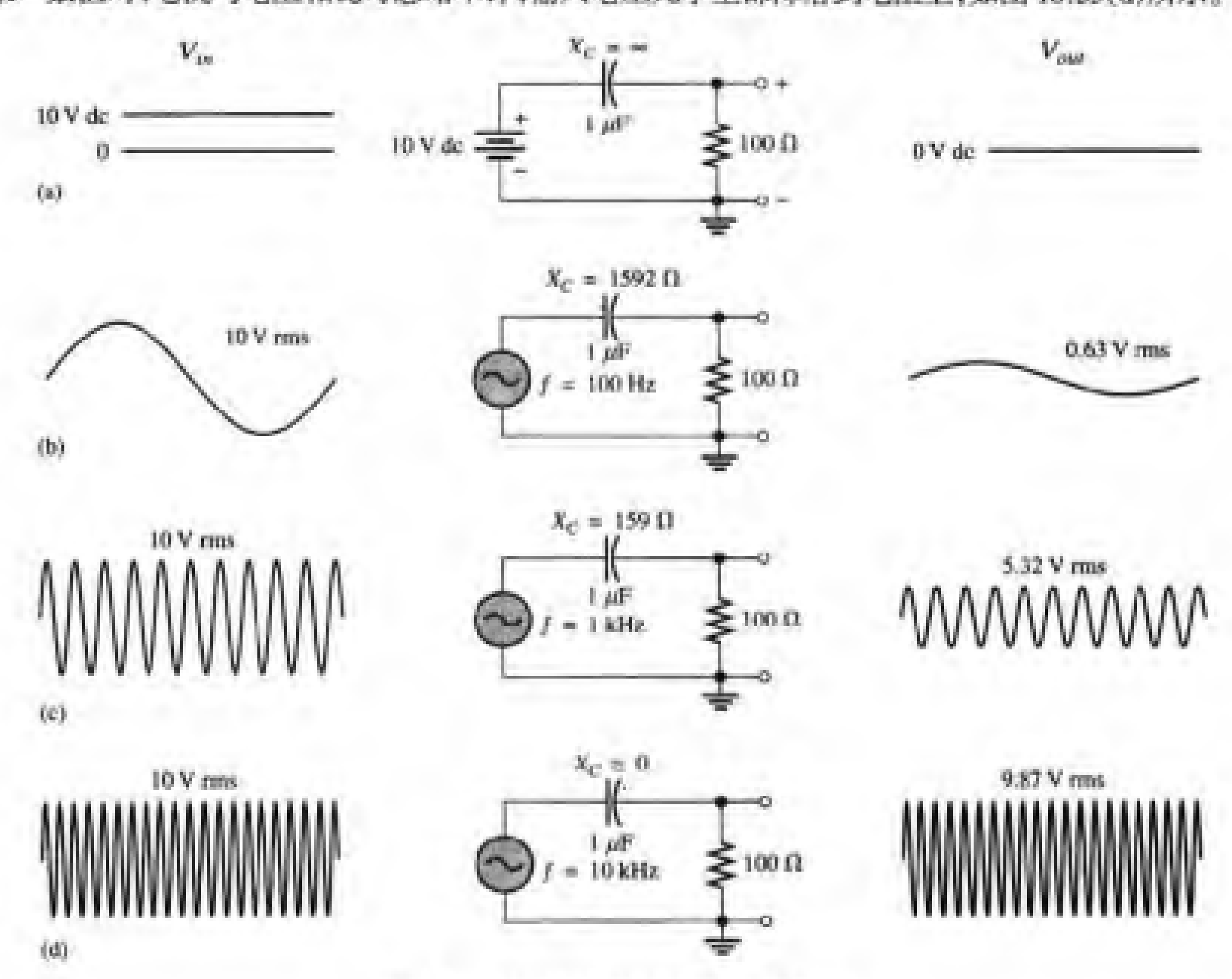


图 16.53　高通滤波器的作用(不考虑相移)

由图 16.53 可知，该电路倾向于阻止低频输入信号到达输出端，而允许高频信号从输入到达输出。因此，这种 RC 电路是一种非常简单的高通滤波器。

图 16.53 中高通滤波器电路的频率响应如图 16.54 所示，图中的曲线表示一组输出电压值与频率的关系。这条响应曲线表明，随着频率的增加，输出电压增加。

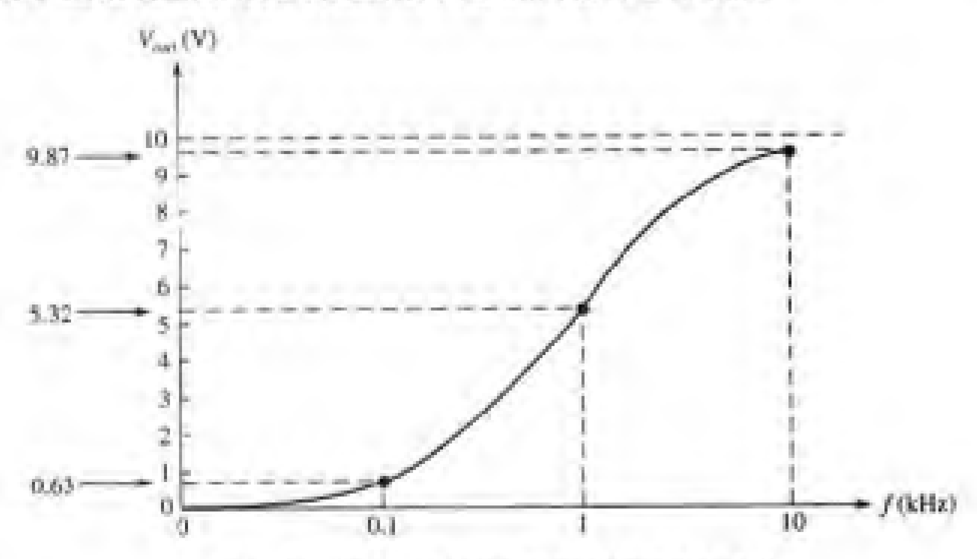


图 16.54　图 16.53 中高通滤波器频率响应曲线

截止频率和滤波器带宽　在低通或高通 RC 滤波器中，使电容电抗等于电阻时的频率值叫做截止频率，用 f_c 表示。截止频率的条件可表示为 $1/(2\pi f_c C) = R$。解出 f_c 得：

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{16.45}$$

在截止频率 f_c 处，滤波器的输出电压是其最大值的 70.7%。一般认为，截止频率是描述滤波器允许或阻止某些频率成分通过的界限。例如，对于高通滤波器，认为所有高于 f_c 的频率成分可以通过滤波器，而所有低于 f_c 的频率成分被滤波器阻止。对于低通滤波器，情况正好相反。

通过滤波器的频率范围叫做带宽。图 16.55 所示为某低通滤波器的带宽和截止频率。

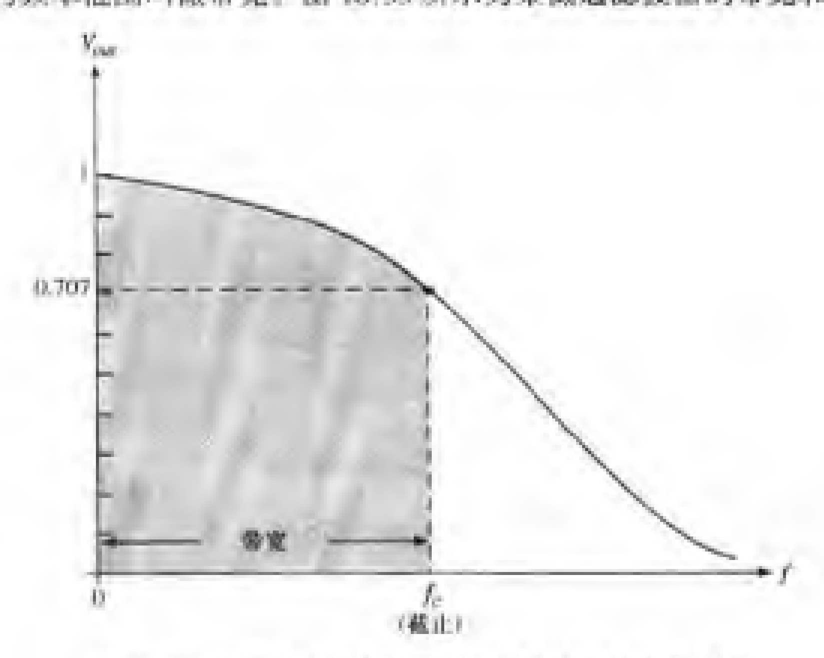


图 16.55　标有截止频率和带宽的低通滤波器响应曲线

16.8.4 将交流信号耦合为直流信号的偏压电路

在图 16.56 中，RC 电路用来产生一个直流电压，使输入的交流电压叠加在它上面。这种电路通常用于放大器电路中，所产生的直流电压给放大器一个偏置电压，使放大器有一个合适的工作点，而需要放大的信号电压通过电容耦合，叠加在直流电平上。同时，电容还可以防止信号源内阻对直流偏压的影响。

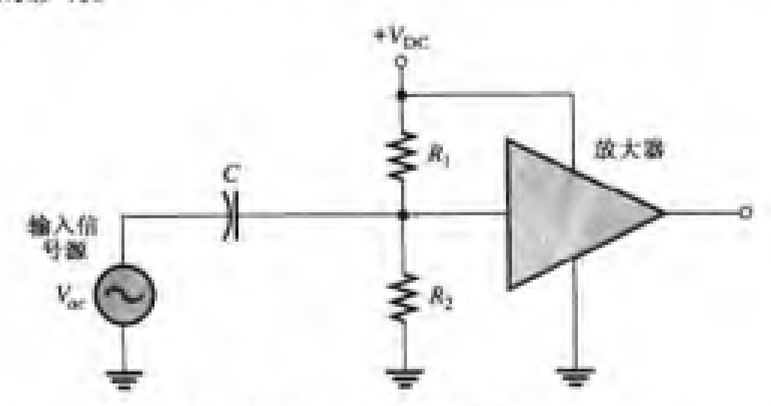


图 16.56 放大器偏置和信号耦合电路

在这种应用中，电容取值相对较大，使电抗远远小于偏置网络中的电阻。电抗非常小（理想值为零）时，电容两端将没有相移和电压降。这样，全部信号电压都能从信号源到达放大器的输入端。

图 16.57 用来说明叠加原理对图 16.56 所示电路的应用。在图 16.57(a)中，交流信号源用短路线取代，短路线使交流信号源的内阻理想化（实际信号源内阻的典型值为 50 Ω 或 600 Ω）。由于电容 C 对直流开路，所以 A 点电压的大小取决于由 R_1 和 R_2 构成的分压器的分压以及直流电压源的电压。

在图 16.57(b)中，短路线取代直流电源，使其内阻理想化。由于电容 C 对交流呈现短路，因此交流信号直接耦合到 A 点，加在 R_1 和 R_2 并联电路两端。

图 16.57(c)显示直流电压与交流电压的叠加结果使信号源“驾”在直流电压上。

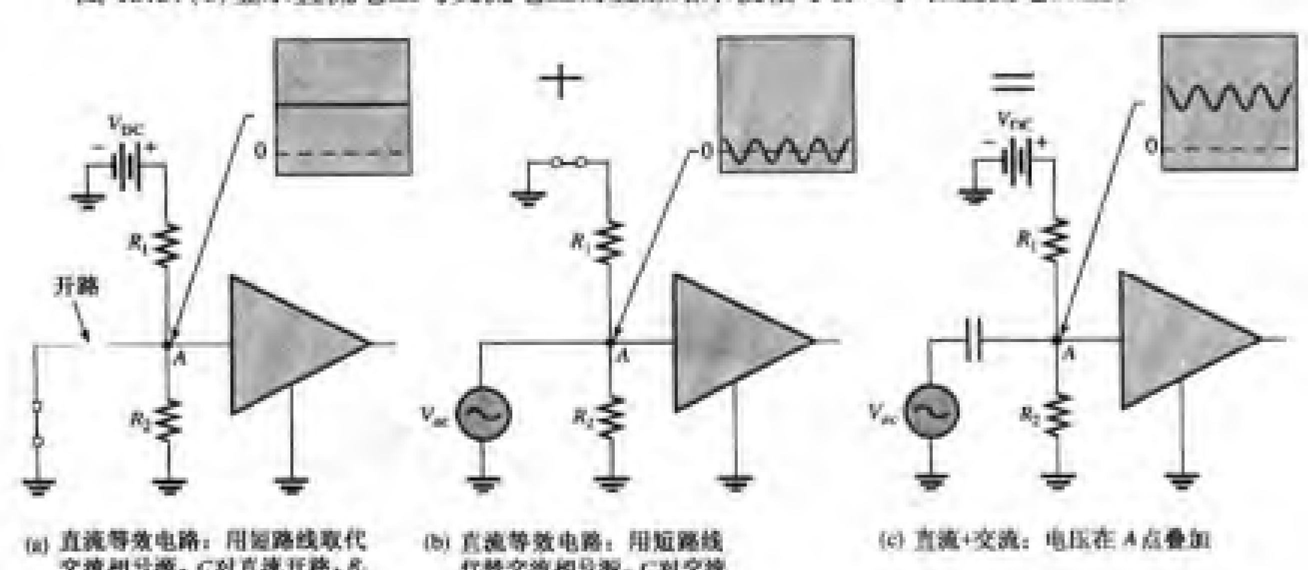


图 16.57 交流与 RC 偏压中的直流电压叠加和耦合电路

16.8 节练习

1. 某 RC 滞后网络的电阻为 4.7 kΩ，电容为 0.022 μF。求工作频率为 3 kHz 时，输入与输出之间的相移。
2. 某 RC 超前网络中的电路元件与第 1 题的相同，求输入电压的有效值为 10 V，工作频率为 3 kHz 时输出电压的大小。
3. RC 电路作为低通滤波器时，输出电压应取自哪个元件的两端？

16.9 故障检修

在本节中，我们将讨论基本 RC 电路中，典型的元件故障或老化所产生的影响。

学完本节后，读者应该能够：

- 检修 RC 电路
- 找出开路电阻或开路电容
- 找出短路电容
- 找出泄漏电容

16.9.1 开路电阻的影响

寻找开路电阻对于基本串联 RC 电路的影响不是一件难事，如图 16.58 所示。显然，电路中没有电流通路，所以电容电压仍然为零，从而使总电压 V_s 降在断开的电阻上。

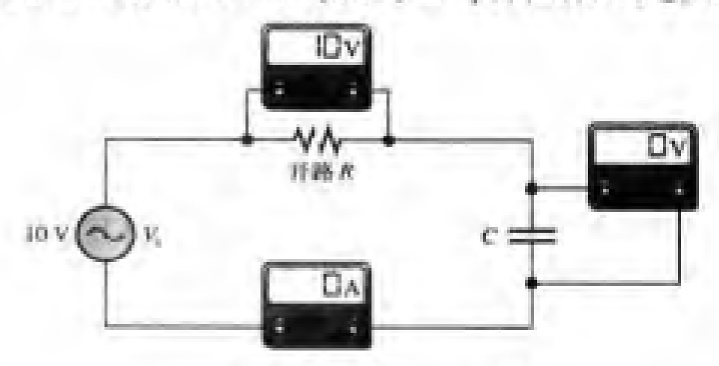


图 16.58 开路电阻的影响

16.9.2 开路电容的影响

电容开路时，电路中没有电流，所以电阻电压仍然为零。总电压全部降在断开的电容两端，如图 16.59 所示。

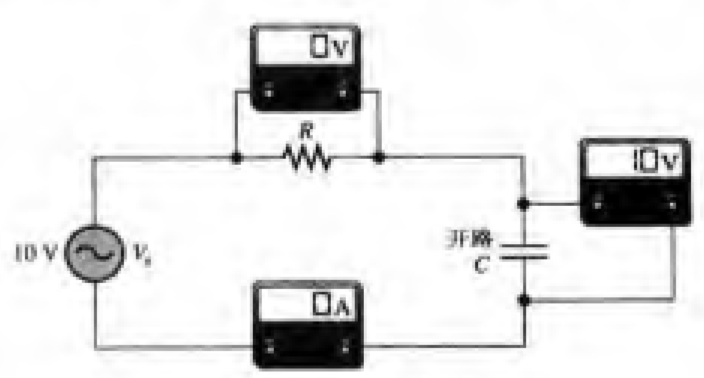


图 16.59 开路电容的影响

16.9.3　短路电容的影响

电容很少短路，而一旦电容短路，电容两端的电压为零，电流等于 V_s/R，总电压全部降在电阻上，如图 16.60 所示。

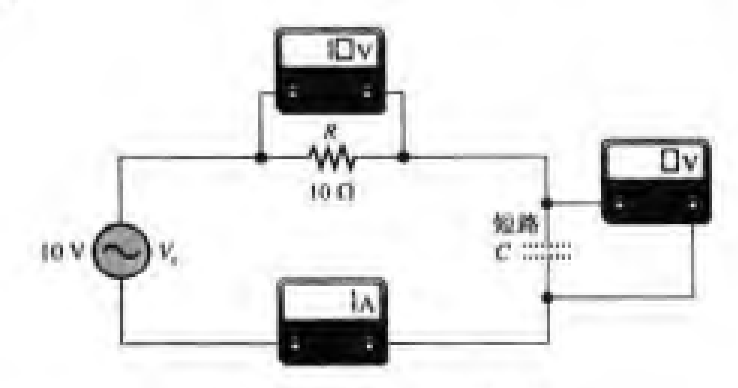


图 16.60　短路电容的影响

16.9.4　电容泄漏的影响

一个大电解电容出现大的电流泄漏时，等效于电容两端附加了一个并联泄漏电阻，如图 16.61(a)所示。当这个泄漏电阻的阻值与电路中的电阻 R 可比拟时，电路响应非常激烈。从电容两端向电源看所得到的电路，可等效表示为图 16.61(b)所示的电路。戴维南等效电阻为 R 与 R_{leak} 并联（电源出现短路），而戴维南等效电压的大小取决于 R 和 R_{leak} 构成的分压器的分压。

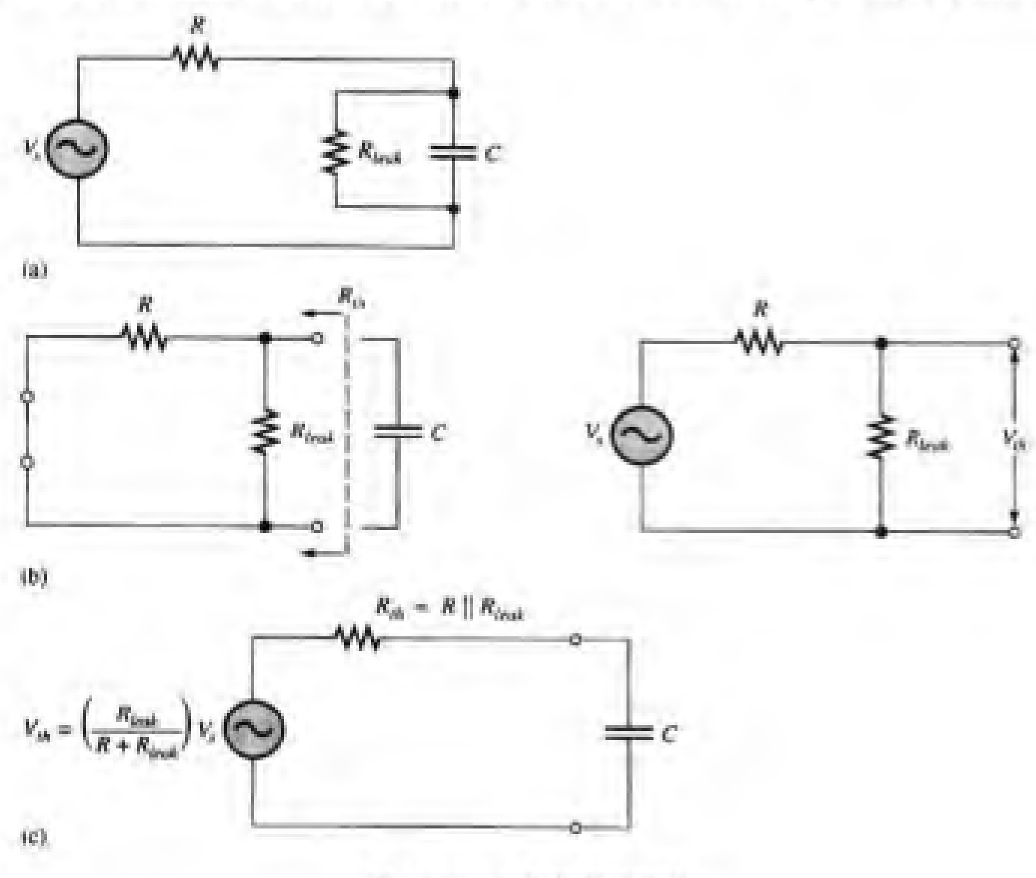


图 16.61　电容泄漏的影响

$$R_{th}=R\|R_{leak}=\frac{RR_{leak}}{R+R_{leak}}$$

$$V_{th}=\left(\frac{R_{leak}}{R+R_{leak}}\right)V_s$$

由此可见,电容电压因为 $V_{th}<V_s$ 而降低。电路时间常数减小,同时电流增大。戴维南等效电路如图 16.61(c)所示。

例 16.18　假设图 16.62 中的电容出现泄漏,泄漏电阻为 10 kΩ。求这种泄漏情况下的输出电压。

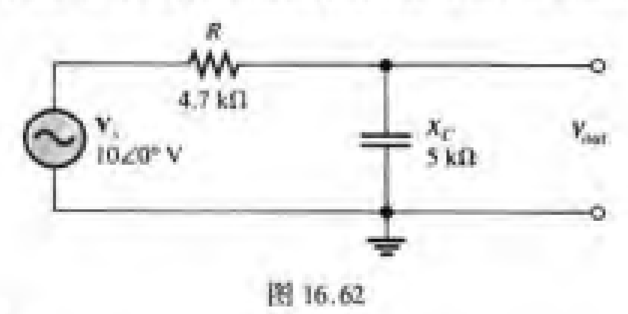


图 16.62

解:电路的等效电阻为:

$$R_{th}=\frac{RR_{leak}}{R+R_{leak}}=\frac{(4.7\text{ k}\Omega)(10\text{ k}\Omega)}{14.7\text{ k}\Omega}=3.20\text{ k}\Omega$$

求输出电压,即戴维南等效电压:

$$V_{th}=\left(\frac{R_{leak}}{R+R_{leak}}\right)V_s=\left(\frac{10\text{ k}\Omega}{14.7\text{ k}\Omega}\right)10\text{ V}=6.80\text{ V}$$

所以,

$$V_{out}=\left(\frac{X_C}{\sqrt{R_{th}^2+X_C^2}}\right)V_{th}=\left(\frac{5\text{ k}\Omega}{\sqrt{(3.2\text{ k}\Omega)^2+(5\text{ k}\Omega)^2}}\right)6.80\text{ V}=\mathbf{5.73\text{ V}}$$

练习:如果电容未发生泄漏,输出电压应为多少?

16.9.5　故障检修中的其他问题

到目前为止,已经介绍了一些特殊的元件故障以及相关的电压测量。然而,有时工作电路的故障不是由有缺陷的元件引起的。一个松动的线圈、一个虚焊点,或是焊点缺少焊锡,都有可能造成开路。而短路则可能是由剪掉的线头或溅落的焊锡引起的。一些看似简单的事情,诸如忘记插好插头,或是函数发生器偶然出现意想不到的故障,电路中参数的错误(比如电阻值不对),函数发生器的频率设置有误,或是电路的输出连接错误,都可造成工作不正常。

电路出现问题时,通常先通过检查,确认电路中各元件是否正确地连接到电路中,并被供电。另外,应检查一些明显的错误,例如破损或松动的连接点,连接器没有插好,某根电线或电桥可能被一些物品短接。

电路不能正常工作时,应当考虑所有的可能性,而不是仅考虑有缺陷的元件。下面的例子将说明如何对一个简单电路采用 APM(分析、计划和测量)法一步步地解决问题。

例 16.19　图 16.63 所示的电路没有输出电压,即电容器两端没有电压。而正常情况下输出电压应为 7.4 V,电路搭建在主板上,试用所学的故障检修方法找出存在的问题。

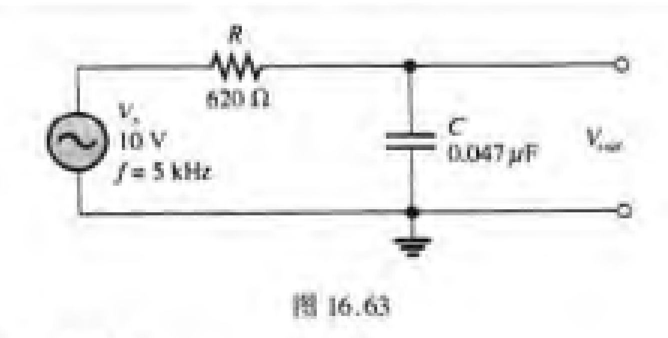


图 16.63

解：应用 APM 法来解决这个问题。

分析：首先针对电路没有输出电压的问题，考虑可能的原因。

1. 没有输入电压或输入电压的频率过高，使电容电抗几乎为零。
2. 输出端短路。有可能是电容内部短路，也有可能是电路中的某元件短路。
3. 电源与输出端之间开路。这种情况下，电流被阻断，从而使输出电压为零。有可能是电阻被断开，或者是由于一个断开或松动的线圈，或是一个坏了的主板连接点造成开路。
4. 某个元件的数值可能有误。可能是电阻的阻值过大，使输出电压被忽略。也有可能是电容值过大，使其电抗接近于零。

计划：首先，应该考虑做一些直观的检查。例如，函数发生器的电源线没有接入或者是频率值设置不正确，电线断开、短接。除此之外，不正确的电阻色码或电容标称都经常能看到。如果在直观检查之后没有发现什么问题，则需要采用电压测量来追踪问题的原因。可以用一个数字示波器或是万用表进行测量。

测量：假设经过检查确信，已接入函数发生器，也正确设定频率，而且没有发现线路开路或短接情况，元件参数也是正确的。

追踪测量的第一步，是用示波器检查函数发生器的输出电压。假设在电路的输入端已经观测到正弦波的有效值为 10 V，频率为 5 kHz，如图 16.64(a)所示。由此可见，电路的输入电压是正确的。所以，第一种可能的原因被排除了。

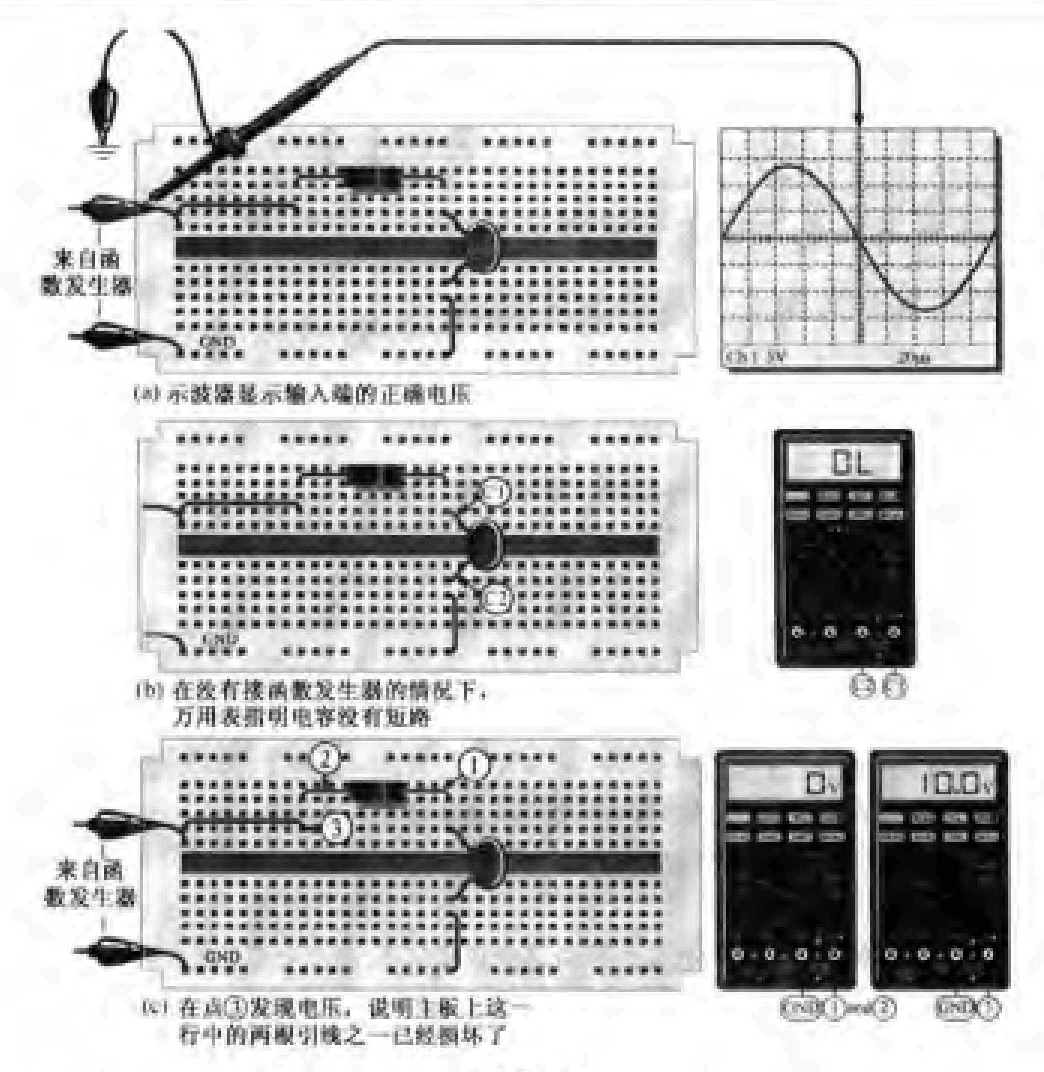
第二步，断开电路的输入，将万用表(置为欧姆挡)加在电容两端，检测电容内部是否短路。如果电容是好的，则经过短时间的充电后万用表显示 OL(过载)，说明电容内部没有短路，如图 16.64(b)所示。第二种可能的原因也被排除了。

既然电压"降"在电路从输入端到输出端的某个地方，所以必然能够找到这个电压。重新接入信号源，用万用表测量电阻两端的电压(置为伏特挡)。若电阻电压为零，说明电阻上没有电流通过，这段电路的某处出现了开路。

现在，从输出端向着电源方向检测电压(当然，也可以从电源向输出端追踪)。检测时，既可以选择使用示波器，也可以使用万用表。如果使用万用表，应该将一个表笔接在地线上，用另一个表笔探测电路。如图 16.64(c)所示，电阻右边的管脚，即点①的电压读数为零。由于已测定加在电阻两端的电压为零，所以电阻左边的管脚，即点②的电压读数也应为零。接着，将表笔接入点③，读数为 10 V。说明电压找到了！既然电阻左边的管脚电压为零，而点③处为 10 V，所以，在主板上这两点之间的内部连线必然出现了问题。有可能是金属线插入过深，造成连线弯曲或损坏，以至于电路之间的连接断开。

移动一个或全部电阻管脚，并将管脚接入同一列中的另一个插孔。若电阻的管脚已经接好，电路的输出端将输出电压(电容两端)。

练习：如果在检查电容之前，已经测得电阻两端的电压为 10 V，这说明了什么问题？



(a) 示波器显示输入端的正确电压

(b) 在没有接函数发生器的情况下，万用表指明电容没有短路

(c) 在点③发现电压，说明主板上这一行中的两根引线之一已经损坏了

图 16.64

16.9 节练习

1. 描述电容泄漏对 *RC* 电路响应的影响。
2. 在一个串联 *RC* 电路中，如果输入电压全部加在电容上，会出现什么问题？
3. 一个串联 *RC* 电路中，如果电源是完好的，是什么原因造成电容两端的电压为 0 V？

技术实践

在第 13 章，采用电容耦合为使用分压偏置的放大器提供输入。在这篇技术实践中，将通过检测一个相似放大器的输出电压和相位延迟，来确定它们随频率变化的规律。如果耦合电容上的电压降过大，会影响放大器的全部工作状态。在开始工作之前，有必要复习第 13 章中技术实践的内容。

正如第 13 章所介绍的，图 16.65 中的耦合电容（C_1）传递输入信号电压到放大器输入端（从 *A* 到点 *B*），而不影响 *B* 点的直流电平，*B* 点的直流电平由电阻分压器（R_1 和 R_2）提供。如果输入信号的频率足够高，使耦合电容的电抗小到几乎可忽略不计时，电容上几乎没有交流压降。信号频率降低时电容电抗增大，会有更多的信号电压降在电容上。结果降低了放大器的电压增益，从而影响到放大器的工作性能。

从电源（点 *A*）到放大器输入端（点 *B*）耦合的电压大小，由图 16.65 所示的电容值和直流偏置电阻值（假设放大器没有负载效应）决定。这些元件实际上构成了一个高通 *RC* 滤波器，如图 16.66 所示。相对于交流电源而论，由于该电源内阻为零，所以分压偏置电阻等效为并联连接。R_2 的下端接地，R_1 的上端接直流电

源，如图 16.66(a)所示。由于+18 V 的直流电源端没有交流电压，R_1 的上端接直流 0 V，这一端叫做交流地。这个电路等效为高通 RC 滤波器的过程如图 16.66(b)和图 16.66(c)所示。

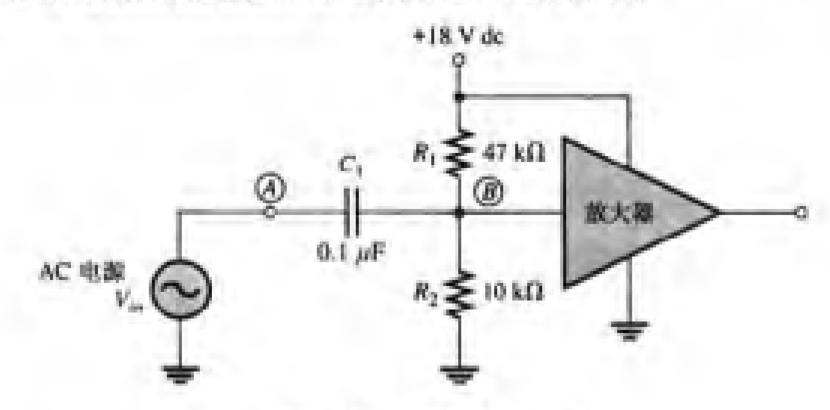


图 16.65 电容耦合放大器

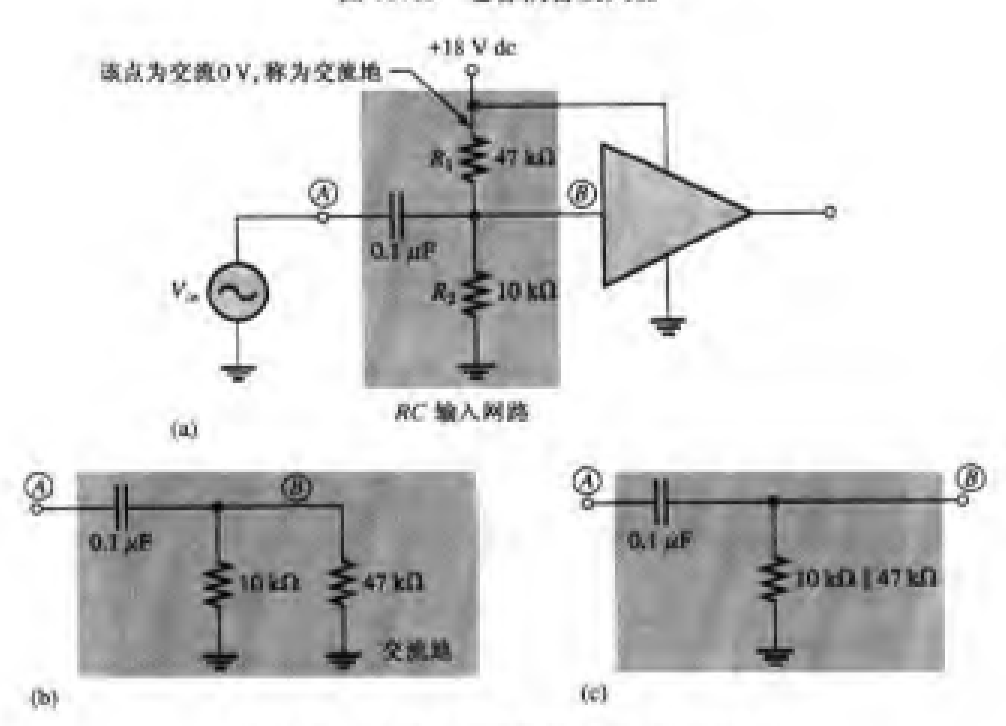


图 16.66 RC 输入电路等效为 RC 高通滤波器

放大器输入电路

- 试确定输入电路的等效电阻。假设放大器(图 16.67 中显示白色线条部分)没有负载效应。

频率为 f_1 的响应

参照图 16.67，输入信号加在放大器电路板上，并显示在示波器通道 1 上，通道 2 接在电路板上某点。

- 试确定通道 2 应接在哪点上？上面应显示怎样的频率和电压？

频率为 f_2 的响应

参照图 16.68 和图 16.67 所示的电路板，放大电路板的输入电压信号如示波器通道 1 所示。

- 试确定通道 2 应显示的电压和频率。
- 叙述频率为 f_1 和 f_2 时通道 2 所显示波形的不同之处，并说明原因。

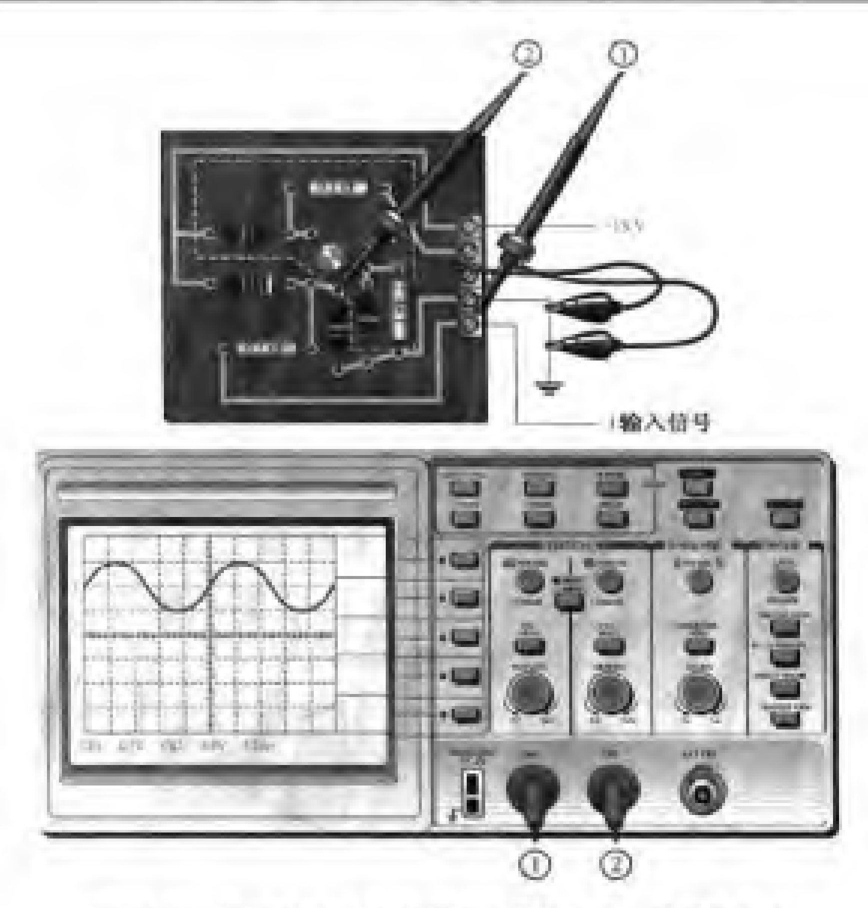


图 16.67 测量频率为 f_1 时输入电路的响应。带圈数字表示示波器的接入点,图中所示为通道1的波形

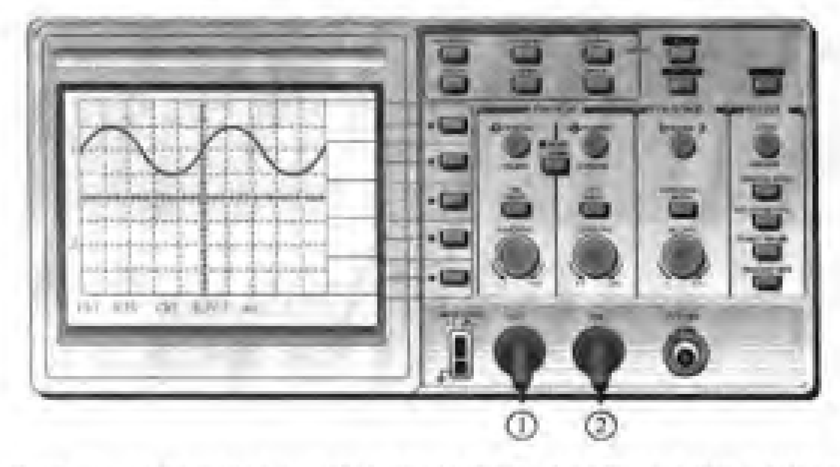


图 16.68 测量频率为 f_2 时输入电路的响应,图中所示为通道 1 的波形

频率为 f_3 时的响应

参照图 16.69 和图 16.67 所示的电路板,放大电路板的输入电压信号如示波器通道 1 所示。

- 试确定通道 2 应该显示的电压和频率。
- 叙述频率为 f_2 和 f_3 时通道 2 所显示波形的不同之处,并说明原因。

放大器输入电路的响应曲线

- 如图 16.65 所示,当 B 点电压值为最大信号电压值的 70.7%时,试求信号的频率。
- 画出该电压值与频率为 f_1、f_2 和 f_3 时的响应曲线。

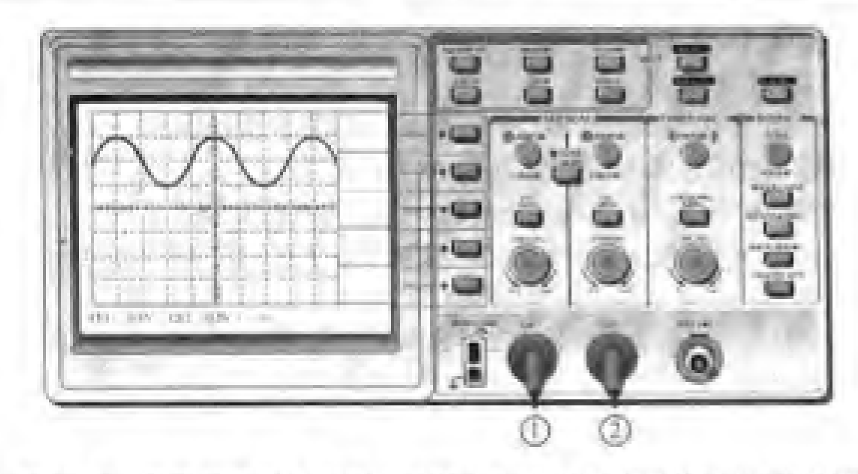


图 16.69 测量频率为 f_1 时输入电路的响应，图中所示为通道 1 的波形

- 这条曲线是如何表明输入电路相当于一个高通滤波器的？
- 在不影响直流偏置电压的情况下，电压为最大值的 70.7%时能否降低频率？

技术实践练习

1. 试阐述降低耦合电容值对放大器输入电路的响应的影响。
2. 耦合电容断开，输入信号的有效值为 10 mV 时，图 16.65 中 B 点的电压值为多少？
3. 电阻 R_1 断开，输入信号的有效值为 10 mV 时，图 16.65 中 B 点的电压值为多少？

小结

- RC 电路的输入为正弦电压时，电路中的电流和所有的电压降也是正弦波。
- 串联或并联 RC 电路中的总电流总是超前于输入电压。
- 电阻上的电压总是与电阻上的电流同相。
- 电容上的电压总是滞后于电容上的电流 90°。
- 在 RC 电路中，电路阻抗由电阻和电容电抗共同决定。
- 阻抗的单位为欧姆。
- 电路的相移是总电流与输入电压的相位差。
- 串联 RC 电路的阻抗随频率反向变化。
- 串联 RC 电路的相移(θ)随频率反向变化。
- 任意频率下的并联 RC 电路，总可等效为一个串联 RC 电路与其对应。
- 任意频率下的串联 RC 电路，总可等效为一个并联 RC 电路与其对应。
- 电路的阻抗可以通过测量输入电压和总电流，再用欧姆定律计算来确定。
- 在 RC 电路中，功率包括电阻功率和电抗功率。
- 电阻功率(有功功率)与电抗功率的相量和叫做视在功率。
- 视在功率用伏安(VA)表示。
- 功率因数(PF)表示有功功率占视在功率的比例。
- 功率因数为 1 的电路是纯电阻电路，而功率因数为 0 的电路为纯电抗电路。
- 在一个滞后网络中，输出电压的相位滞后于输入电压相位。
- 在一个超前网络中，输出电压的相位超前于输入电压相位。
- 滤波器允许某些频率成分通过，而阻止其他频率成分通过。

主要术语

导纳(Y)：电抗电路允许电流通过的能力的量度，是阻抗的倒数。单位是西门子(S)。

视在功率(P_a):电阻功率(有功功率)与电抗功率(无功功率)的相量和。单位是伏安(VA)。

带宽:可通过滤波器的频率范围。

电容电纳(B_C):电容允许电流通过的能力,是电容电抗的倒数。单位是西门子(S)。

截止频率:滤波器输出电压为其最大输出电压的70.7%时的频率。

滤波器:一种允许某些频率成分通过,而阻止其他频率成分通过的电路。

频率响应:在电子电路中,输出电压(或电流)在特定频率范围的变化过程。

阻抗:用欧姆表示的对于正弦电流的总的反抗能力。

功率因数:表示功率伏安与有功功率或瓦特之间的相互关系。伏安乘以功率因数等于有功功率。

公式

串联 RC 电路

16.1 $\mathbf{X}_C = -jX_C$

16.2 $\mathbf{Z} = R - jX_C$

16.3 $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$

16.4 $\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$

16.5 $\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$

16.6 $\mathbf{V} = \mathbf{IZ}$

16.7 $\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}}$

16.8 $\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}$

16.9 $\mathbf{V}_s = V_R - jV_C$

16.10 $\mathbf{V}_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{V_C}{V_R}\right)$

16.11 $V_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$

16.12 $\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{V_C}{V_R}\right)$

并联 RC 电路

16.13 $\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)\angle\left(-90^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)\right)$

16.14 $Z = \frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$

16.15 $\theta = -90^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$

16.16 $\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right)$

16.17 $\mathbf{G} = \frac{1}{R\angle 0^\circ} = G\angle 0^\circ$

16.18 $\mathbf{B}_C = \frac{1}{X_C\angle -90^\circ} = B_C\angle 90^\circ = -jB_C$

16.19 $\mathbf{Y} = \frac{1}{Z\angle \pm\theta} = Y\angle \pm\theta$

16.20 $Y = G + jB_C$

16.21 $V = \frac{I}{Y}$

16.22 $I = VY$

16.23 $Y = \frac{I}{V}$

16.24 $I_{tot} = I_R + jI_C$

16.25 $I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{I_C}{I_R}\right)$

16.26 $I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$

16.27 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{I_C}{I_R}\right)$

16.28 $R_{eq} = Z\cos\theta$

16.29 $X_{C(eq)} = Z\sin\theta$

16.30 $\theta = \left(\frac{\Delta t}{T}\right)360°$

RC 电路的功率

16.31 $P_{true} = I^2R$

16.32 $P_r = I^2X_C$

16.33 $P_a = I^2Z$

16.34 $P_{true} = P_a\cos\theta$

16.35 $P_{true} = VI\cos\theta$

16.36 $PF = \cos\theta$

滞后网络

16.37 $\phi = -90° + \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$

16.38 $V_{out} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in}$

16.39 $V_{out} = IX_C$

16.40 $V_{out} = V_{out}\angle\phi$

超前网络

16.41 $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$

16.42 $V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in}$

16.43 $V_{out} = IR$

16.44 $V_{out} = V_{out}\angle\phi$

16.45 $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

自测题

1. 在串联 RC 电路中，电阻两端的电压：
   (a) 与电源电压同相　　(b) 滞后于电源电压 90°
   (c) 与电流同相　　(d) 滞后于电流 90°

2. 在串联 RC 电路中,电容两端的电压:
   (a) 与电源电压同相　(b) 滞后于电阻电压 90°
   (c) 与电流同相　(d) 滞后于电源电压 90°
3. 串联 RC 电路输入电压的频率增加时,阻抗将:
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 不变　(d) 加倍
4. 串联 RC 电路输入电压的频率减小时,相移将:
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 不变　(d) 不确定
5. 在串联 RC 电路中,当频率和电阻加倍时,阻抗将:
   (a) 加倍　(b) 减半　(c) 为 4 倍　(d) 不确定
6. 在串联 RC 电路中,电阻两端电压的有效值为 10 V,电容两端电压的有效值也为 10 V,电源电压的有效值为:
   (a) 20 V　(b) 14.14 V　(c) 28.28 V　(d) 10 V
7. 第 6 题中电压值是某一频率下的测量值。要使电阻电压大于电容电压,则频率应:
   (a) 增加　(b) 减小　(c) 不变　(d) 无关
8. 当 $R = X_C$ 时,相移为:
   (a) 0°　(b) +90°　(c) −90°　(d) 45°
9. 要将相移减到 45°以下,必须具备以下哪个条件?
   (a) $R = X_C$　(b) $R < X_C$　(c) $R > X_C$　(d) $R = 10X_C$
10. 电压源的频率增加时,并联 RC 电路的阻抗将:
    (a) 增加　(b) 减小　(c) 不变
11. 在并联 RC 电路中,通过电阻支路的电流的有效值为 1 A,通过电容支路的电流的有效值也为 1 A。总电流的有效值为:
    (a) 1 A　(b) 2 A　(c) 2.28 A　(d) 1.414 A
12. 功率因数为 1 表明电路的相移为:
    (a) 90°　(b) 45°　(c) 180°　(d) 0°
13. 对于某负载,有功功率为 100 W,无功功率为 100 VAR。视在功率为:
    (a) 200 VA　(b) 100 VA　(c) 141.4 VA　(d) 141.4 W
14. 电源标准的额定值表示为:
    (a) W　(b) VA　(c) VAR　(d) 都不是

故障检修测验

参见图 16.72

1. 如果 C 断开,C 两端的电压将:
   (a) 升高　(b) 降低　(c)不变
2. 如果 R 断开,C 两端的电压将:
   (a) 升高　(b) 降低　(c) 不变
3. 若频率变高,R 两端的电压将:
   (a) 升高　(b) 降低　(c) 不变

参见图 16.73

4. 如果 R_1 断开,R_2 两端的电压将:
   (a) 升高　(b) 降低　(c) 不变
5. 若 C_2 增加到 0.47 μA,C_2 两端的电压将:
   (a) 升高　(b) 降低　(c) 不变

参见图 16.77

6. 如果 R 断开，C 两端的电压将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
7. 如果电源电压增加，则 X_C 将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变

参见图 16.82

8. 如果 R_2 断开，从 R_2 顶端到地的电压将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
9. 若 C_2 短路，则 C_1 两端的电压将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
10. 如果电源电压的频率增加，则通过电阻的电流将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
11. 如果电源电压的频率减小，则通过电容的电流将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变

参见图 16.87

12. 如果 C_3 断开，从 B 点对地的电压将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
13. 如果 C_2 断开，从 B 点对地的电压将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
14. 如果将 C 点对地短路，从 A 点对地的电压将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
15. 如果电容 C_3 断开，从 B 点对 D 点的电压将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
16. 如果电源频率增加，从 C 点对地的电压将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
17. 如果电源频率增加，从电源输出的电流将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变
18. 如果 R_2 短路，C_1 两端的电压将：
(a) 升高 (b) 降低 (c) 不变

习题（标有 * 的习题难度较大，奇数题的答案在本书的最后）

第一部分：串联电抗电路

16.1 RC 电路的正弦响应

1. 串联 RC 电路的输入电压为 8 kHz 的正弦波，电阻两端电压的频率为多少？电容两端电压的频率又为多少？
2. 第 1 题描述的电路中的电流波形是什么？

16.2 节 串联 RC 电路的阻抗和相移

3. 求图 16.70 中每一个电路阻抗的极坐标形式和直角坐标形式。
4. 求图 16.71 所示的每个电路阻抗的模和阻抗角。
5. 求图 16.72 所示电路工作于以下频率时的阻抗的极坐标形式：
(a) 100 Hz (b) 500 Hz (c) 1 kHz (d) 2.5 kHz

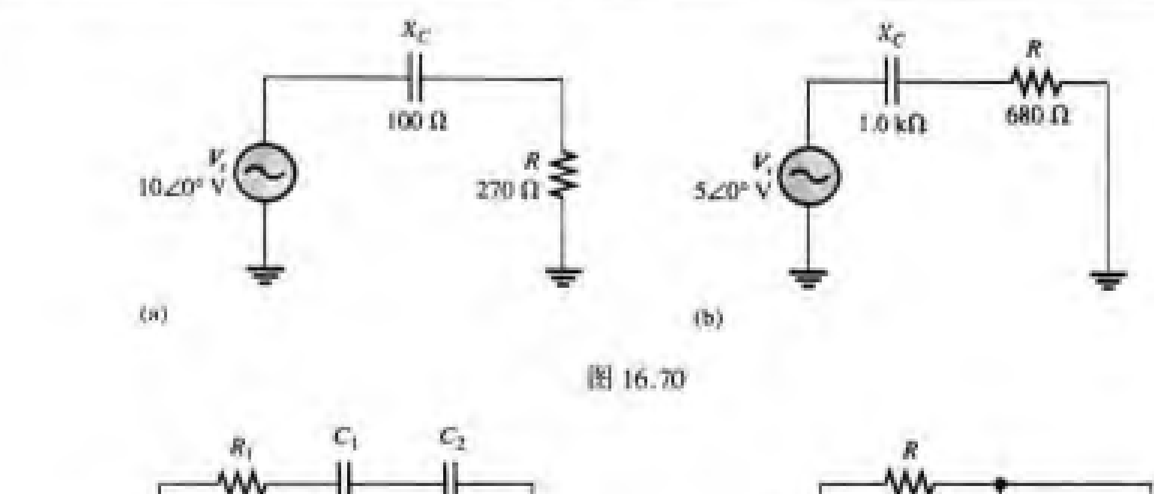
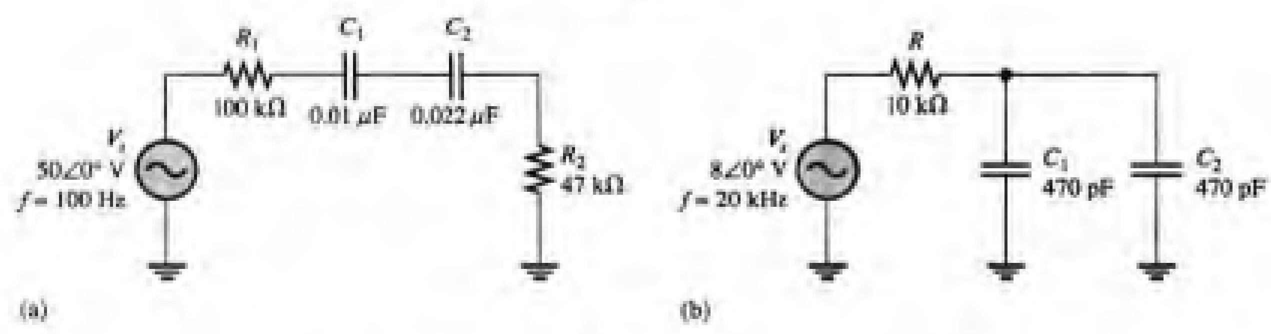


图 16.70



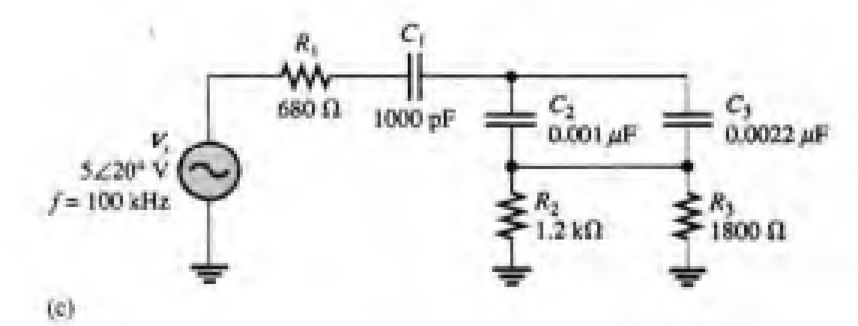


图 16.71

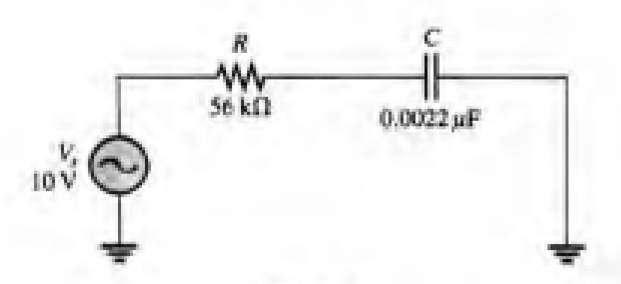


图 16.72

6. 当 $C = 0.0047\ \mu F$ 时，重复第 5 题。
7. 串联 RC 电路的阻抗为以下各值时，求 R 和 X_C。

   (a) $\mathbf{Z} = 33\ \Omega - j50\ \Omega$　　(b) $\mathbf{Z} = 300\angle -25°\ \Omega$

   (c) $\mathbf{Z} = 1.8\angle -67.2°\ \text{k}\Omega$　　(d) $\mathbf{Z} = 789\angle -45°\ \Omega$

16.3 节　串联 RC 电路的分析

8. 求图 16.70 所示每个电路中电流的极坐标形式。
9. 计算图 16.71 所示每个电路的总电流，并用极坐标形式表示。

10. 求图 16.71 所示每个电路的输入电压与电流的相位差。

11. 在图 16.72 所示的电路中，$f=5$ kHz，重复第 10 题。

12. 对图 16.73 所示的电路，画出表示所有电压和总电流的相量图，指出其相位差。

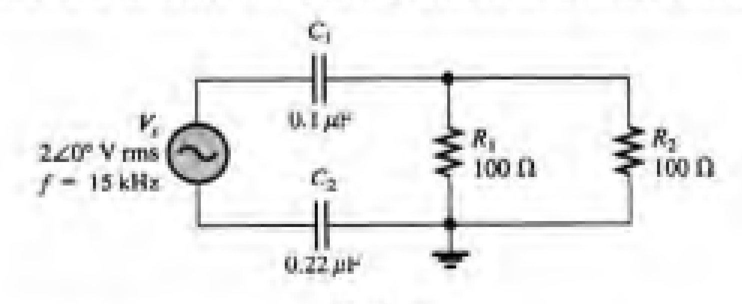


图 16.73

13. 对图 16.74 所示的电路，确定以下各变量的极坐标形式。

(a) $\mathbf{Z}$　(b) $\boldsymbol{I}_{tot}$　(c) $\boldsymbol{V}_R$　(d) $\boldsymbol{V}_C$

*14. 在图 16.75 所示的电路中，要使总电流为 10 mA，变阻器的值应为多少？阻抗角为多少？

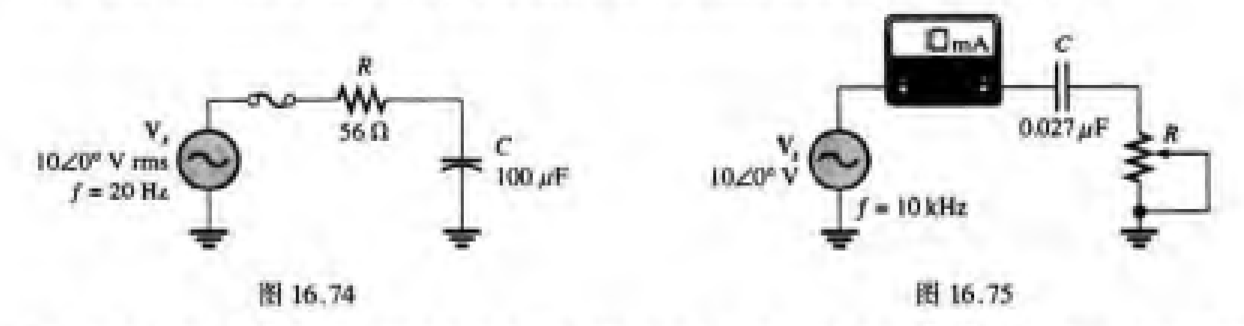


图 16.74　　图 16.75

*15. 确定图 16.76 所示电路中方框所表示的串联元件或元件组，已知电路中 $P_{true}=400$ W，且功率因数超前（I_{tot} 超前于 V_s）。

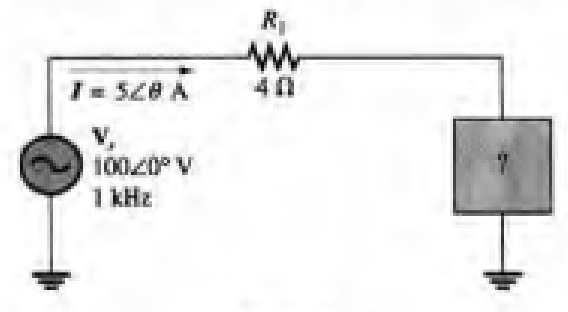


图 16.76

第二部分：并联电抗电路

16.4 节　并联电抗电路的阻抗和相位差

16. 确定图 16.77 所示电路的阻抗，并表示为极坐标形式。

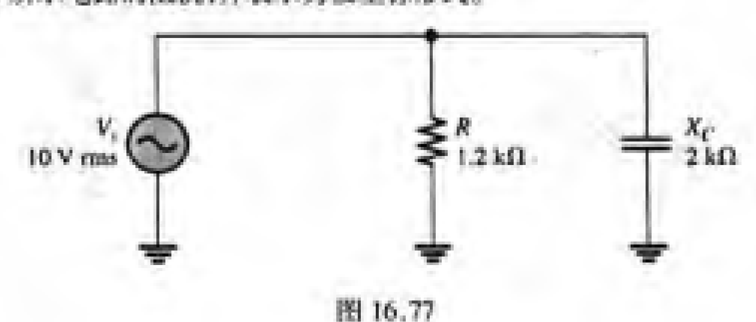


图 16.77

17. 求图 16.78 所示电路的阻抗的模和阻抗角。

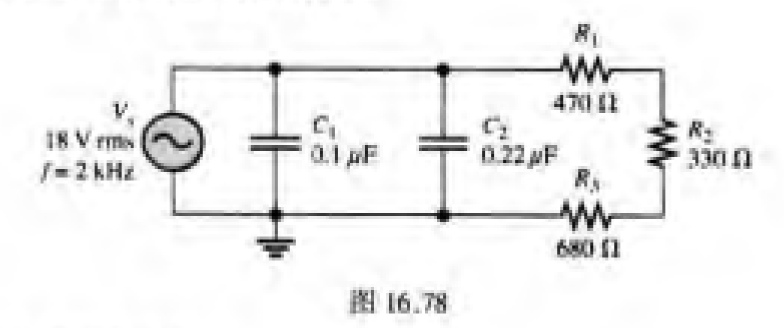


图 16.78

18. 对于下列频率,重复第 17 题。

(a) 1.5 kHz (b) 3 kHz (c) 5 kHz (d) 10 kHz

16.5 节 并联 *RC* 电路的分析

19. 对图 16.79 所示的电路,求极坐标形式的所有电流和电压。

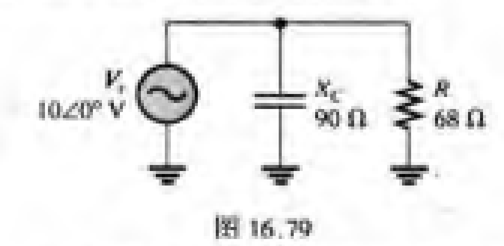


图 16.79

20. 对图 16.80 所示的并联电路,求每条支路电流和总电流的大小,以及输入电压与总电流之间的相位差。

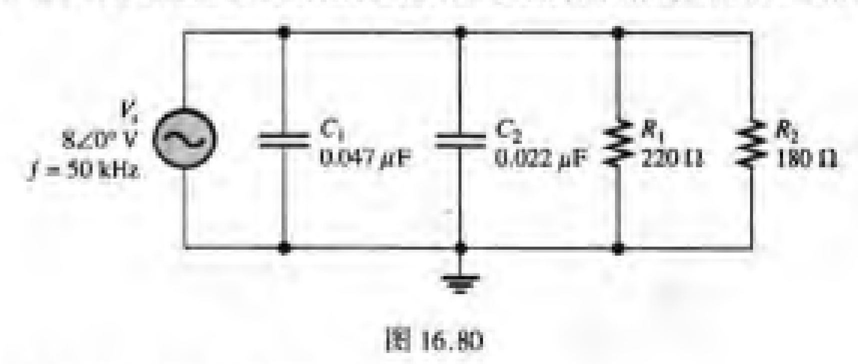


图 16.80

21. 对图 16.81 所示的电路,求下列变量。

(a) $\mathbf{Z}$ (b) $\mathbf{I}_R$ (c) $\mathbf{I}_{C(tot)}$ (d) $\mathbf{I}_{tot}$ (e) θ

22. 若 $R = 5.6\ \text{k}\Omega, C_1 = 0.047\ \mu\text{F}, C_2 = 0.022\ \mu\text{F}, f = 500\ \text{Hz}$,重复第 21 题。

*23. 求图 16.82 所示电路的等效串联形式。

*24. 要使图 16.83 所示电路中的电源电压与总电流之间的相位差为 30°,R_1 应为多少?

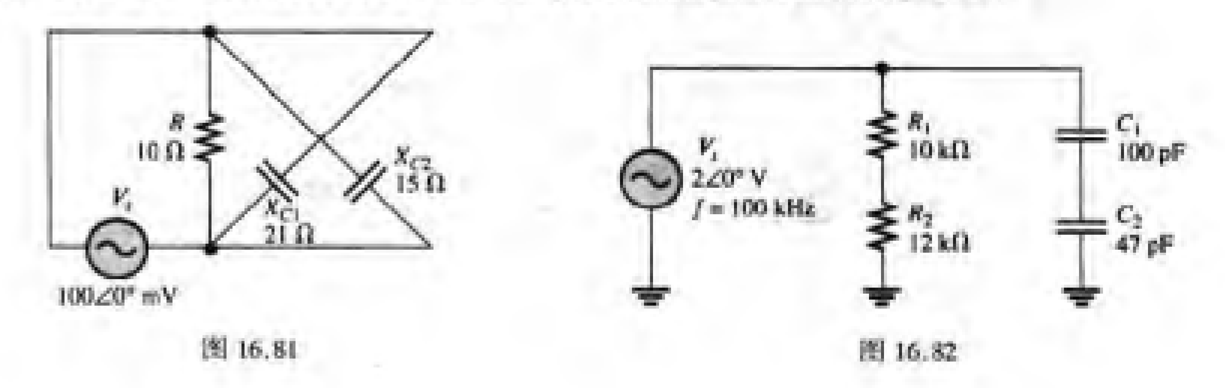


图 16.81 图 16.82

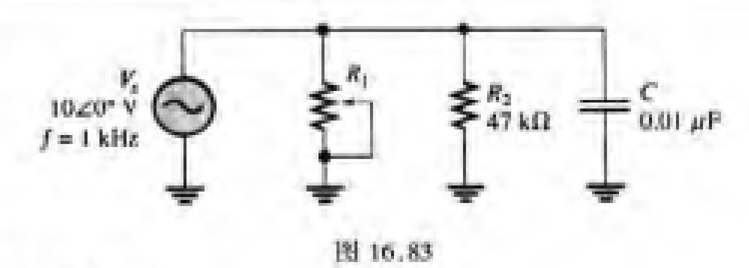


图 16.83

第三部分：串－并联电抗电路

16.6 节 串－并联 RC 电路的分析

25. 求图 16.84 所示电路中每个元件上电压的极坐标形式，并画出相量图。
26. 图 16.84 所示电路是电阻支配性质的还是电容支配性质的？
27. 求图 16.84 所示电路中每条支路的电流和总电流，并表示为极坐标形式。画出电流相量图。

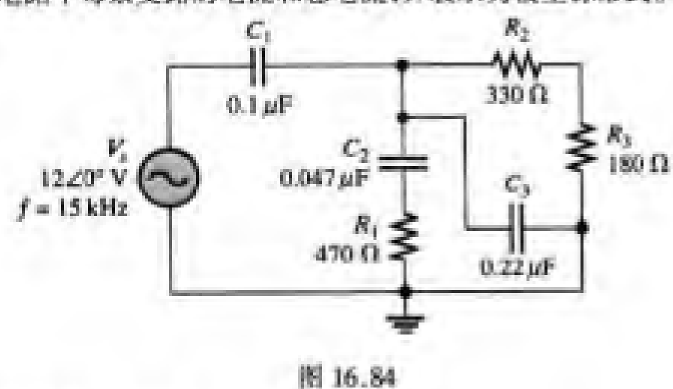


图 16.84

28. 求图 16.85 所示电路的下列变量：

   (a) I_{tot} (b) θ (c) V_{R1} (d) V_{R2} (e) V_{R3} (f) V_C

*29. 求图 16.86 所示电路中 $V_A = V_B$ 时 C_2 的值。

*30. 求图 16.87 所示各点的电压及其相位。

31. 求图 16.87 所示电路中通过各元件的电流。

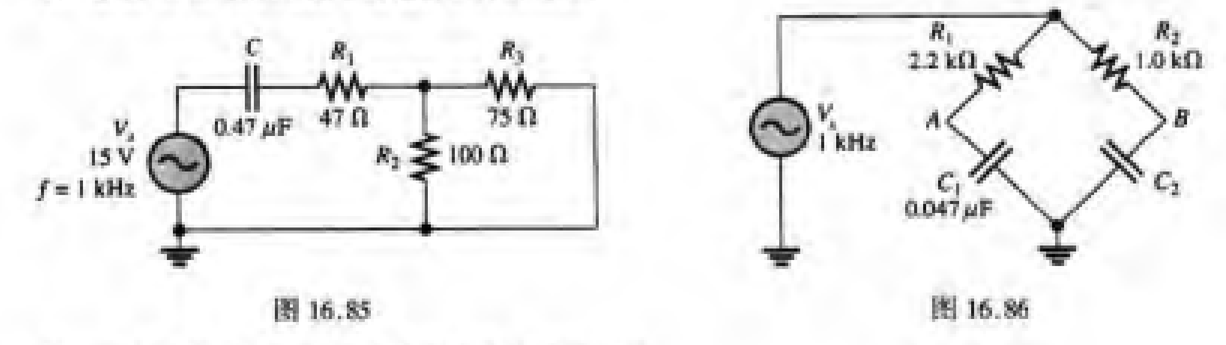


图 16.85　　　　图 16.86

32. 画出图 16.87 所示电路中电压和电流的相量图。

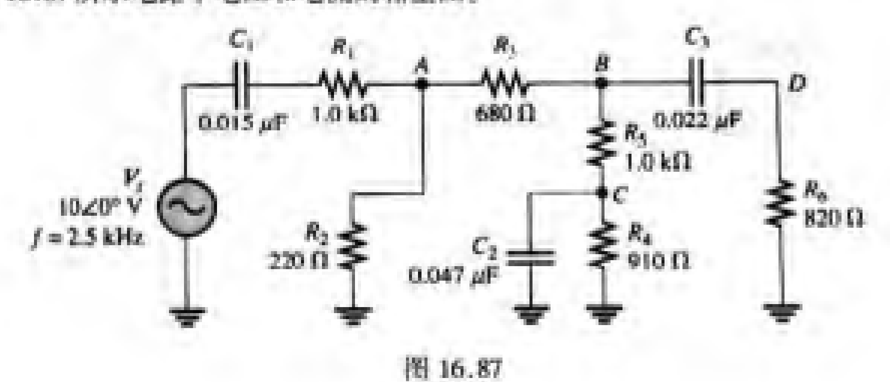


图 16.87

第四部分:专题讨论

16.7 节 RC 电路中的功率

33. 某串联 RC 电路中,有功功率为 2 W,而无功功率为 3.5 VAR,求视在功率。
34. 求图 16.74 所示电路的有功功率和无功功率。
35. 求图 16.82 所示电路的功率因数。
36. 求图 16.85 所示电路的 P_{true}、P_r、P_a 和 PF。画出功率三角形。
*37. 用 240 V、60 Hz 的信号源驱动两个负载,负载 A 的阻抗为 50 Ω,功率因数为 0.85;负载 B 的阻抗为 72 Ω,功率因数为 0.95。
    (a) 每个负载的输入电流为多少?
    (b) 每个负载的无功功率为多少?
    (c) 每个负载的有功功率为多少?
    (d) 每个负载的视在功率为多少?
    (e) 与该信号源相连的哪个负载上的电压降更大?

16.8 节 基本应用

38. 求图 16.88 所示滞后网络工作于以下频率时,输入电压与输出电压之间的相位差。
    (a) 1 Hz (b) 100 Hz (c) 1 kHz (d) 10 kHz
39. 将图 16.88 所示的滞后网络作为低通滤波器,画出频率范围从 0 Hz 到 10 kHz,步长为 1 kHz 的输出电压的频率响应曲线。
40. 对图 16.89 所示的超前网络,重复习题 38。
41. 画出图 16.89 所示超前网络的输出电压的频率响应曲线,频率范围从 0 Hz 到 10 kHz,步长为 1 kHz。
42. 画出图 16.88 和图 16.89 中每个电路的电压相量图。电路工作频率为 5 kHz,电源电压有效值 V_s = 1 V rms。

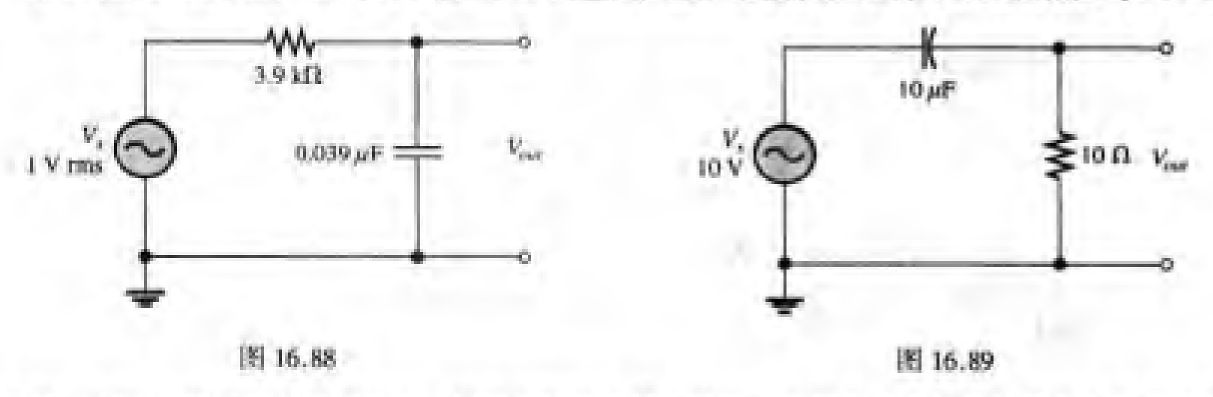


图 16.88　　图 16.89

*43. 求图 16.90 中耦合电容的值。该值应使放大器 2 的输入电压为放大器 1 的输出电压最大值的 70.7%。电路的工作频率为 20 Hz。

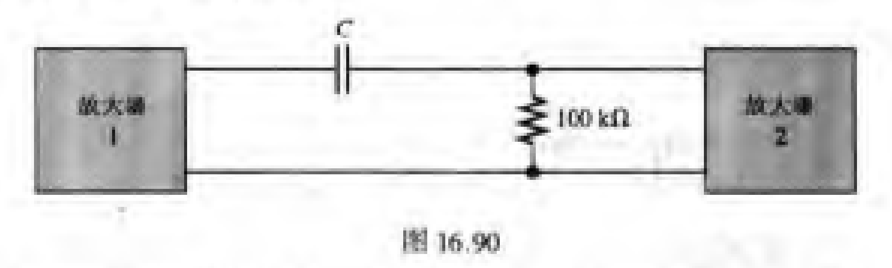


图 16.90

44. 图 16.91 中放大器 A 的输出电压有效值为 50 mV。如果放大器 B 的输入电阻为 10 kΩ,求电路工作频率为 3 kHz 时,由耦合电容消耗的电压。

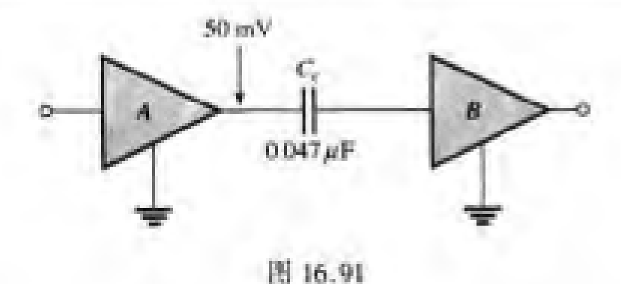


图 16.91

16.9 节　故障检修

45．假设图 16.92 中的电容有严重泄漏，说明这种泄漏对输出电压和相位差的影响。并且，假设泄漏电阻为5 kΩ，工作频率为 10 Hz。

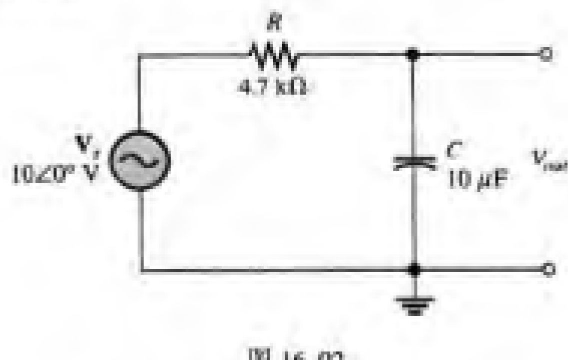


图 16.92

*46．图 16.93 中每个电容的泄漏电阻为 2 kΩ，求每个电路的输出电压。

47．求图 16.93(a)所示电路出现以下故障时的输出电压，并与正确输出进行比较。

(a) R_1 开路　(b) R_2 开路　(c) C 开路　(d) C 短路

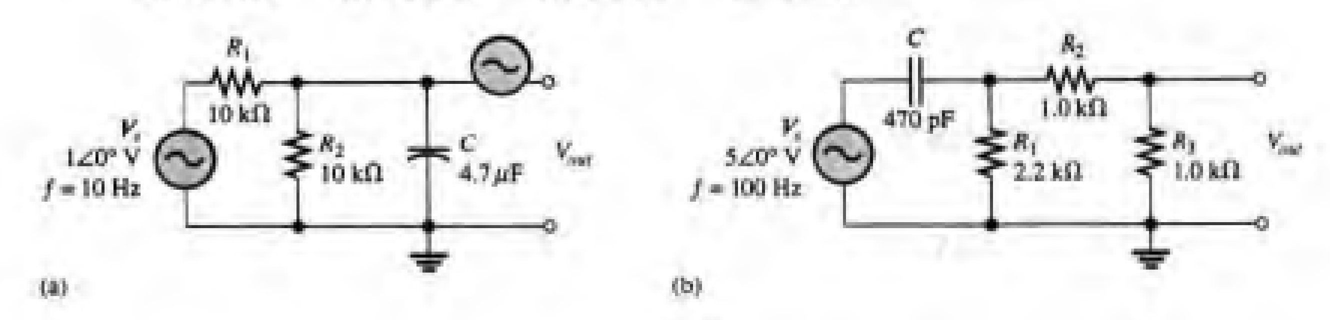


图 16.93

48．求图 16.93(b)所示电路出现以下故障时的输出电压，并与正确输出进行比较。

(a) C 开路　(b) C 短路　(c) R_1 开路　(d) R_2 开路　(e) R_3 开路

EWB/Multisim 故障检修

这些问题需查阅本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

49．打开文件 P16.49，确定是否存在故障。若存在，请找出。

50．打开文件 P16.50，确定是否存在故障。若存在，请找出。

51．打开文件 P16.51，确定是否存在故障。若存在，请找出。

52．打开文件 P16.52，确定是否存在故障。若存在，请找出。

53．打开文件 P16.53，确定是否存在故障。若存在，请找出。

54．打开文件 P16.54，确定是否存在故障。若存在，请找出。

55. 打开文件 P16.55,求滤波器的频率响应。

56. 打开文件 P16.56,求滤波器的频率响应。

答案

16.1节　*RC* 电路的正弦响应

1. 电压频率为 60 Hz 的正弦波,电流频率为 60 Hz。
2. 电容电抗造成相位差。
3. 相移接近 0°。

16.2节　串联 *RC* 电路的阻抗和相移

1. $R = 150\ \Omega$; $X_C = 220\ \Omega$
2. $\mathbf{Z} = 33\ \text{k}\Omega - j50\ \text{k}\Omega$
3. $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = 59.9\ \text{k}\Omega$; $\theta = -\tan^{-1}(X_C/R) = -56.6°$

16.3节　串联 *RC* 电路的分析

1. $V_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} = 7.21\ \text{V}$
2. $\theta = -\tan^{-1}(X_C/R) = -56.3°$
3. $\theta = 90°$
4. 当 f 增加时,X_C 减小,Z 减小,θ 减小。

16.4节　并联电抗电路的阻抗和相位差

1. 电导是电阻的倒数,电容电纳是电容电抗的倒数,导纳是阻抗的倒数。
2. $Y = 1/Z = 1/\sqrt{R^2 + X_C^2} = 10\ \text{mS}$
3. $\mathbf{Y} = 1/\mathbf{Z} = 25.1\angle 32.1°\ \text{mS}$
4. $\mathbf{Z} = 39.8\angle -32.1°\ \Omega$

16.5节　并联 *RC* 电路的分析

1. $I_{tot} = V_s Y = 21\ \text{mA}$
2. $I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = 18\ \text{mA}$; $\theta = \tan^{-1}(I_C/I_R) = 56.3°$; θ 和电源电压有关。
3. $\theta = 90°$

16.6节　串－并联 *RC* 电路的分析

1. 参见图 16.94。
2. $\mathbf{Z}_{tot} = \mathbf{V}_s/\mathbf{I}_{tot} = 36.9\angle -51.6°\ \Omega$

图 16.94

16.7节　*RC* 电路中的功率

1. 电阻消耗功率。
2. $PF = \cos\theta = 0.707$
3. $P_{true} = I^2 R = 1.32\ \text{kW}$; $P_r = I^2 X_C = 1.84\ \text{kVAR}$; $P_a = I^2 Z = 2.26\ \text{kVA}$

16.8节　基本应用

1. $\phi = -90° + \tan^{-1}(X_C/R) = -62.8°$
2. $V_{out} = \left(R/\sqrt{R^2 + X_C^2}\right)V_{in} = 8.90\ \text{V rms}$
3. 输出为电容两端的电压。

16.9　故障检修

1. 泄漏电阻与电容并联，改变了电路的时间常数。
2. 电容开路。
3. 断开的电阻或电容短路使电容两端的电压为 0 V。

技术实践

1. 较低的耦合电容增大了频率，该频率使电压降低。
2. $V_B = 3.16$ V dc
3. $V_B = 10$ mV rms

实例相关练习

16.1　选择屏幕上的 C 点：

(114.612390255∠−60.75…)

参见图 16.95。

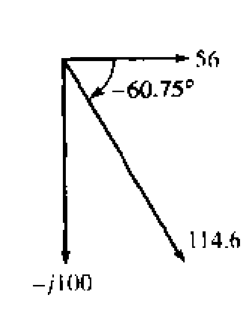


图 16.95

16.2　$V_s = 2.56\angle -38.5°$ V

16.3　$I = 3.80\angle 33.4°$ mA

16.4　$Z = 15.9$ kΩ, $\theta = -86.4°$

16.5　$Z = 24.3\angle -76.0°$ Ω

16.6　$Y = 4.60\angle 48.8°$ mS

16.7　$I = 6.16\angle 42.4°$ mA

16.8　$I_{tot} = 117\angle 31.0°$ mA

16.9　$R_{eq} = 8.99$ kΩ, $X_{C(eq)} = 4.38$ kΩ

16.10　$V_1 = 7.05\angle 8.9°$ V, $V_2 = 3.21\angle -18.9°$ V

16.11　$V_{R1} = 766\angle 67.5°$ mV; $V_{C1} = 1.85\angle -22.5°$ V;

$V_{R2} = 1.58\angle 37.6°$ V;

$V_{C2} = 1.22\angle -52.4°$ V；见图 16.96。

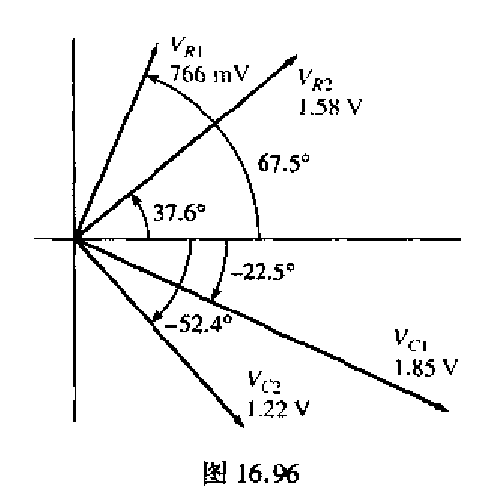


图 16.96

16.12　$PF = 0.146$

16.13　$P_{true} = 213$ mW

16.14　相位滞后增加。

16.15　输出电压减小。

16.16　相位超前减小。

16.17　输出电压增加。

16.18　$V_{out} = 7.29$ V

16.18　电阻断开。

自测题

1.(c)　2.(b)　3.(b)　4.(a)　5.(d)　6.(b)　7.(a)　8.(d)
9.(c)　10.(b)　11.(d)　12.(d)　13.(c)　14.(b)

故障检修测验

1.(b)　2.(b)　3.(a)　4.(a)　5.(b)　6.(c)　7.(c)　8.(a)　9.(a)
10.(c)　11.(b)　12.(a)　13.(a)　14.(b)　15.(a)　16.(b)　17.(a)　18.(a)

第 17 章　*RL* 电路

引言

本章将介绍串联和并联 *RL* 电路。*RL* 电路的分析和 *RC* 电路类似,最大的不同点在于相位响应是相反的。感抗随着频率增加,而容抗随着频率减小。

RL 电路包含电阻和感抗,这是即将讨论到的感应电路中的一种基本类型。本章将介绍基本串联和并联 *RL* 电路,以及这些电路在输入正弦电压时的响应。本章还将分析串并联电路,*RL* 电路中有功、无功和视在功率,还将介绍一些基本 *RL* 电路应用。其中,*RL* 电路应用包括滤波器和相位转换网。本章最后还将涉及到故障检修。

知识点及其学习方法选择

如果选择方法 1,先学完第 16 章 *RC* 电路的所有知识点,然后再学习本章后面的所有内容。

如果选择方法 2,先学完第 16 章的 4 个主要部分的基础,然后是本章和后面第 18 章的相应部分。

本章目标

第一部分:串联电抗电路

- 描述 *RL* 电路中电流和电压的关系
- 描述串联 *RL* 电路中的阻抗和相位角
- 分析串联 *RL* 电路

第二部分:并联电抗电路

- 并联 *RL* 电路的阻抗和相位角
- 分析并联 *RL* 电路

第三部分:串并联电抗电路

- 分析串并联 *RL* 电路

第四部分:专题讨论

- 判断 *RL* 电路的功率
- 讨论几种基本的 *RL* 应用
- *RL* 电路的故障检修

主要术语

- 感性电抗
- 感性电纳(B_L)

技术实践

在技术实践中,要求用已掌握的 *RL* 电路知识确定一个滤波电路。同时判断每个元件的值以符合定值,选择正确测量电路的仪器设备。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

第一部分：串联电抗电路

17.1　RL 电路的正弦响应

如同 RC 电路，输入电压是正弦波时，任何一种 RL 电路中的电流和电压都是正弦波。由于电感的存在，电压和电流之间产生相移，该相移的大小取决于电阻和感抗的相对大小。

学完本节，读者应该能够：

- 描述 RL 电路中电流和电压的关系
- 讨论电压和电流的波形
- 描述相移

在 RL 电路中，电阻的电压和电流滞后于电源电压。感应电压超前于电源电压。理想状态下，电流和感应电压之间的相位角总是 90°。这些无显著特点的相位关系如图 17.1 所示。由图中可以看出，这些相位关系和第 16 章中讨论的 RC 电路的相位关系相反。

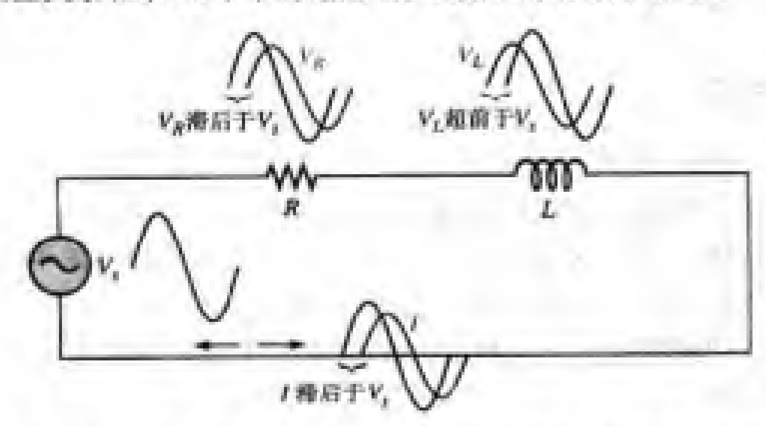


图 17.1　V_R、V_L 和 I 相对于源电压的一般相位关系的正弦响应示图

电压和电流的幅度和相位的关系取决于电阻和感性电抗的值。电路是纯电感电路时，输入电压和总电流之间的相位角是 90°，且电流滞后于电压。电路是电阻和电感电抗的混合电路时，相位角在 0°和 90°之间，取决于电阻和电感电抗的相对值。

前面谈到，实际的电感是由线圈绕成的，线圈之间存在电容，加上其他因素使得电感无法视为理想元件。在实际电路中，这些影响是很大的；但是为了单独研究电感作用，本章中（除了技术实践部分）的电感视为理想电感。

7.1 节练习

1. 1 kHz 正弦信号输入到 RL 电路，输出电流的频率是多少？
2. 如果 RL 电路中的电阻值大于感抗，那么输入电压和总电流之间的相位角接近 0°还是 90°？

17.2 串联 *RL* 电路的阻抗和相角

任一类型 *RL* 电路的阻抗是正弦电流的总阻力,单位是欧姆。相位角是总电流和源电压之间的相位差。

学完本节,读者应该能够:

- 试求串联 *RL* 电路的阻抗和相角
- 复杂形式中的感性电抗的表示
- 定义复杂形式中的总阻抗
- 计算阻抗相量的大小和相角

串联 *RL* 电路的阻抗取决于电阻和感性电抗。第 14 章已经介绍过,感性电抗是用直角坐标系中的复数形式表示的,如下:

$$\mathbf{X}_L = jX_L \tag{17.1}$$

图 17.2 所示的串联 *RL* 电路中,总阻抗是 R 和 jX_L 的相量和,表示为:

$$\mathbf{Z} = R + jX_L \tag{17.2}$$

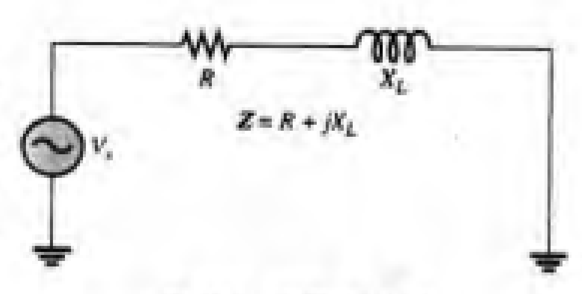


图 17.2 串联 *RL* 电路

17.2.1 阻抗三角形

在交流分析中,R 和 X_L 都视为相量,如图 17.3(a)中的相量图所示。其中,X_L 相对于 R 相差 $+90°$。产生这种差别的原因是,在串联 *RL* 电路中,电感的电压超前于电流,同样也超前于电阻的电压,并且都是超前 90°。由于 **Z** 是 R 和 jX_L 的相量和,因此 Z 可用图 17.3(b)所示的相量图表示。三个相量重新组成了一个直角三角形,如图 17.3(c)所示,这个直角三角形叫做阻抗三角形。与相量所对应的三角形的边长表示相量的大小,单位是欧姆;而角度 θ 表示 *RL* 电路中输入电压和电流之间的相位角。

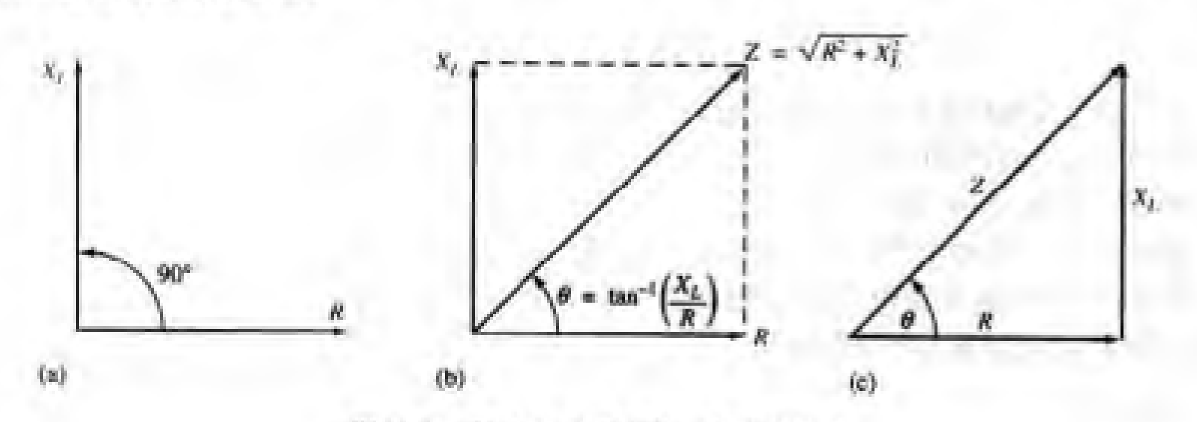


图 17.3 串联 *RL* 电路阻抗三角形的形成

串联 *RL* 电路的阻抗大小可以用电阻和电抗表示为:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \tag{17.3}$$

阻抗的单位是欧姆。

相位角 θ 表示为：

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{17.4}$$

结合相量的模和角度，阻抗极坐标形式表示如下：

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{17.5}$$

例 17.1　对于图 17.4 中的每个电路，写出每种阻抗的直角坐标和极坐标形式。

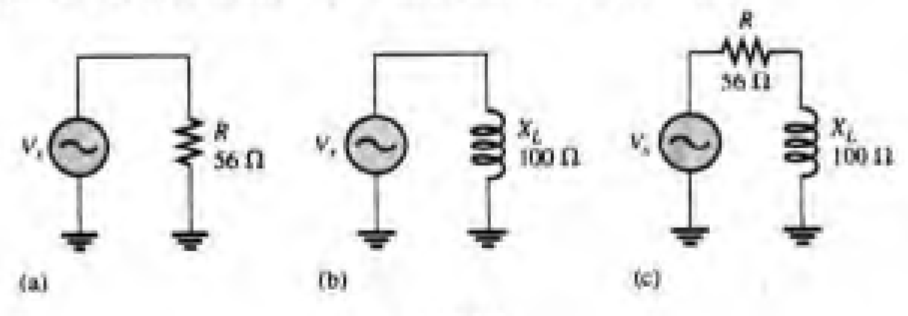


图 17.4

解：如图 17.4(a)所示，阻抗为：

$\mathbf{Z} = R + j0 = R = \mathbf{56\ \Omega}$　　直角坐标形式（$X_L = 0$）

$\mathbf{Z} = R\angle 0° = \mathbf{56\angle 0°\ \Omega}$　　极坐标形式

阻抗等效为电阻，相位角为零，因为是纯电阻电路，没有引入相位角。

如图 17.4(b)所示，阻抗为：

$\mathbf{Z} = 0 + jX_L = \mathbf{j100\ \Omega}$　　直角坐标形式（$R = 0$）

$\mathbf{Z} = X_L\angle 90° = \mathbf{100\angle 90°\ \Omega}$　　极坐标形式

该例中阻抗等效为感性电纳，且相位角是 +90°，因为感抗使得电流滞后于电压 90°。

如图 17.4(c)所示，阻抗的直角坐标形式是：

$$\mathbf{Z} = R + jX_L = \mathbf{56\ \Omega + j100\ \Omega}$$

阻抗的极坐标形式是：

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(56\ \Omega)^2 + (100\ \Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{56\ \Omega}\right) = \mathbf{115\angle 60.8°\ \Omega}$$

在该例中，阻抗为电阻和感性电抗的相量和。相位角是由 X_L 和 R 的相对值确定的。

练习：在 RL 串联电路中，$R = 1.8\ \text{k}\Omega$ 并且 $X_L = 950\ \Omega$。用直角坐标和极坐标两种形式表示阻抗。

17.2 节练习

1. 某个 RL 电路的阻抗是 150 Ω + j220 Ω，那么电阻值是多少？感性电抗是多少？
2. 串联 RL 电路的总电阻是 33 kΩ，感性电抗是 50 kΩ。用直角坐标形式写出阻抗的相位表达式。变换成阻抗的极坐标形式。

17.3　串联 RL 电路的分析

在上一节中，我们探讨了如何表示串联 RL 电路的阻抗。现在，我们将利用欧姆定律和基尔霍夫电压定律来分析 RL 电路。

学完本节,读者应该能够:

- 分析串联 *RL* 电路
- 应用欧姆定律和基尔霍夫定律到串联 *RL* 电路
- 用相量表示电压和电流
- 阐明阻抗和相位角是如何随频率变化的

17.3.1 欧姆定律

欧姆定律应用于串联 *RL* 电路中时,涉及的变量是相量 **Z**、**V** 和 **I**。第 16 章描述的 *RC* 电路中欧姆定律的三个等效公式,在这里将再次应用于 *RL* 电路中。

$$\mathbf{V}=\mathbf{I}\mathbf{Z} \qquad \mathbf{I}=\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}} \qquad \mathbf{Z}=\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}$$

由于欧姆定律的计算涉及乘法和除法运算,因此电压、电流和阻抗必须用极坐标形式表示。

例 17.2 如图 17.5 所示,已知电流用极坐标形式表示为 $\mathbf{I}=0.2\angle 0°$ mA。试用极坐标形式表示源电压,并画出用以表明源电压和电流之间关系的相量图。

解:感性电抗的大小是:

$$X_L=2\pi fL=2\pi(10\text{ kHz})(100\text{ mH})=6.28\text{ k}\Omega$$

总阻抗的直角坐标形式为:

$$\mathbf{Z}=R+jX_L=10\text{ k}\Omega+j6.28\text{ k}\Omega$$

换成极坐标形式为:

$$\mathbf{Z}=\sqrt{R^2+X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$
$$=\sqrt{(10\text{ k}\Omega)^2+(6.28\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{6.28\text{ k}\Omega}{10\text{ k}\Omega}\right)=\mathbf{11.8\angle 32.1°\ k\Omega}$$

利用欧姆定律可以得出源电压:

$$\mathbf{V}_s=\mathbf{I}\mathbf{Z}=(0.2\angle 0°\text{ mA})(11.8\angle 32.1°\text{ k}\Omega)=\mathbf{2.36\angle 32.1°\ V}$$

源电压的大小是 2.36 V,相对于电流的角度是 32.1°,即电压超前于电流 32.1°,相量图如图 17.6 所示。

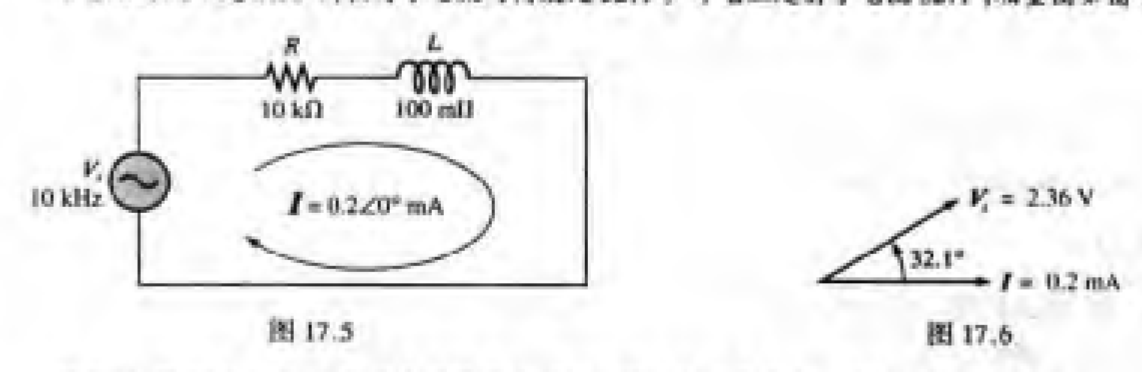


图 17.5　　图 17.6

练习:如图 17.5 所示,如果源电压等于 $5\angle 0°$ V,那么电流是多少?用极坐标形式表示。

17.3.2 电流和电压的相位关系

在串联 *RL* 电路中,流过电阻和电感的电流是处处相等的。但是,电阻上的电压和电流是同相位的,电感的电压超前于电流 90°。因此,电阻上的电压 V_R 与电感上的电压 V_L 的相位差为 90°,其波形如图 17.7 所示。

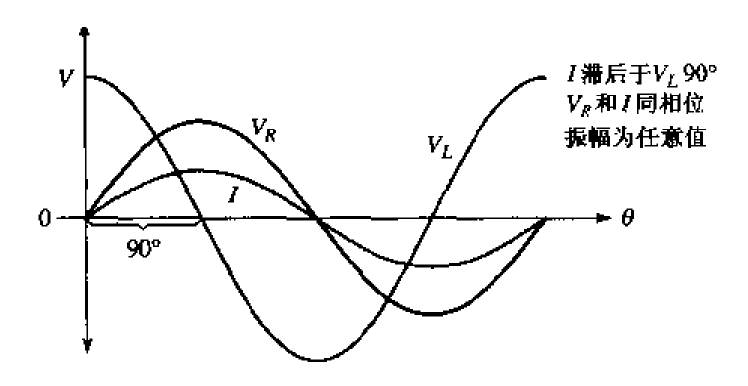


图 17.7　串联 RL 电路中电压和电流的相位关系

根据基尔霍夫电压定律可知：总电压降必须等于输入电压。然而，由于 V_R 和 V_L 不是同相位的，因此要将其相加必须用相量的形式表示，V_L 超前于 V_R 相位 90°，如图 17.8(a)所示。在图 17.8(b)中，V_s 表示 V_R 和 V_L 的相量和。

$$V_s = V_R + jV_L \tag{17.6}$$

该式也可用极坐标形式表示为：

$$V_s = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{V_L}{V_R}\right) \tag{17.7}$$

其中源电压的大小是：

$$V_s = \sqrt{V_R^2 + V_L^2} \tag{17.8}$$

电阻电压和源电压之间的相位角是：

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_L}{V_R}\right) \tag{17.9}$$

由于电阻的电压和电流同相位，θ 同样表示为源电压和电流之间的相位。图 17.9 所示的是图 17.7 所示波形图的电压和电流的相图。

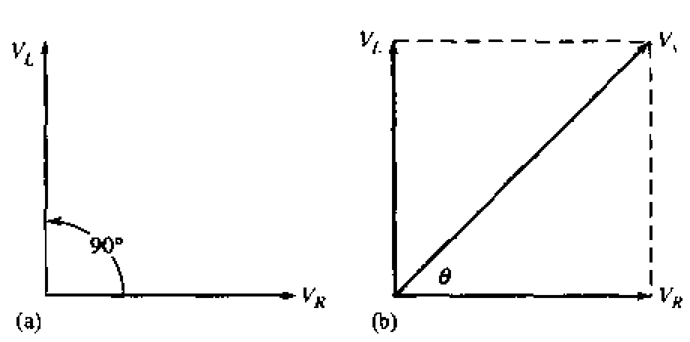


图 17.8　串联 RL 电路的电压相图

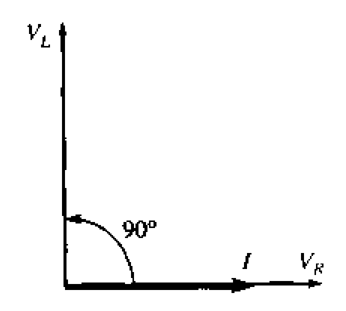


图 17.9　图 17.7 中所示波形的电压和电流的相量图

17.3.3　阻抗和相角随频率变化

阻抗三角形形象地表明输入电压的频率如何影响 RL 电路的响应。正如前面所述，感性电抗和频率成正比。当 X_L 增加时，总电抗的值随着增大；当 X_L 减小时，总电抗随着减小。因此，Z 随频率的增加而增加。相位 θ 同样随频率的增加面增加，其中 $\theta = \tan^{-1}(X_L/R)$。反之亦然，当 X_L 随频率增大时，θ 也增大。

如图 17.10 所示，利用阻抗三角形阐述频率变化时，X_L，Z 和 θ 也发生变化。当然，R 保持不变。由于 X_L 和频率成正比，使得总阻抗的大小和相角也和频率成正比，参见例 17.3。

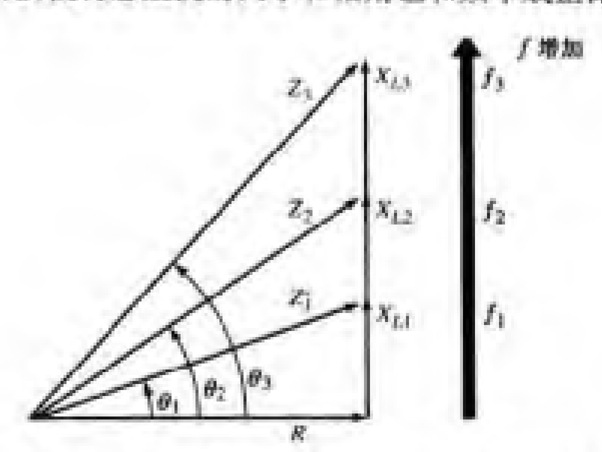


图 17.10 频率增加时，X_L，Z 和 θ 均增大。可以用不同的阻抗三角形表示出每个频率值

例 17.3 串联 RL 电路如图 17.11 所示，当频率为下列各个值时，试求总阻抗的大小和相角。

(a) 10 kHz (b) 20 kHz (c) 30 kHz

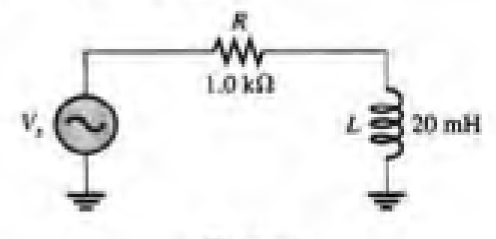


图 17.11

解：(a) 对于 $f = 10$ kHz，

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(10\text{ kHz})(20\text{ mH}) = 1.26\text{ k}\Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (1.26\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.26\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 1.61\angle 51.6^\circ\text{ k}\Omega$$

因此，$Z = \mathbf{1.61\ k\Omega}$，且 $\theta = \mathbf{51.6^\circ}$。

(b) 对于 $f = 20$ kHz，

$$X_L = 2\pi(20\text{ kHz})(20\text{ mH}) = 2.51\text{ k}\Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (2.51\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{2.51\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 2.70\angle 68.3^\circ\text{ k}\Omega$$

因此，$Z = \mathbf{2.70\ k\Omega}$，且 $\theta = \mathbf{68.3^\circ}$。

(c) 对于 $f = 30$ kHz，

$$X_L = 2\pi(30\text{ kHz})(20\text{ mH}) = 3.77\text{ k}\Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (3.77\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{3.77\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{3.90\angle 75.1^\circ\ k\Omega}$$

因此，$Z = \mathbf{3.90\ k\Omega}$，且 $\theta = \mathbf{75.1^\circ}$。

由此可知，随着频率增加，X_L，Z 和 θ 也在增加。

练习：如图 17.11 所示，如果频率等于 100 kHz，求 Z 和 θ。

17.3 节练习

1. 在某个串联 RL 电路中，$V_R = 2$ V，$V_L = 3$ V。那么源电压的大小是多少？
2. 上题中，源电压和电流之间的相角是多少？
3. 串联 RL 电路中，如果输入电压的频率变大，感性电抗会发生什么变化？总阻抗的大小呢？相角呢？

第二部分：并联电抗电路

17.4　并联电抗电路的阻抗和相角

本节将介绍如何确定并联 RL 电路的阻抗和相角。同时，还将介绍并联 RL 电路中的感性电纳和导纳。

学完本节后，读者应该能够：

- 试求并联 RL 电路中的阻抗和相角
- 描述复杂形式的总阻抗
- 定义并计算感性电纳和导纳

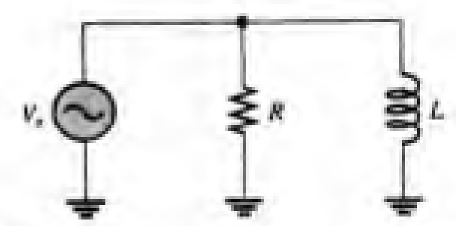


图 17.12　并联 RL 电路

图 17.12 所示两个元件并联 RL 电路的总阻抗表达式是由乘积和法则得出，演算过程如下：

$$\mathbf{Z} = \frac{(R\angle 0^\circ)(X_L\angle 90^\circ)}{R + jX_L} = \frac{RX_L\angle(0^\circ + 90^\circ)}{\sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)}$$

$$\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)\angle\left(90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)\right) \tag{17.10}$$

式 17.10 表示的是基本并联 RL 电路的总阻抗。其中，阻抗的模为：

$$Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \tag{17.11}$$

输入电压和总电流之间的相角为：

$$\theta = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{17.12}$$

同样，上式也可以等效为：

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right) \tag{17.13}$$

例 17.4　两个电路如图 17.13 所示，试求其总阻抗的模和相角。

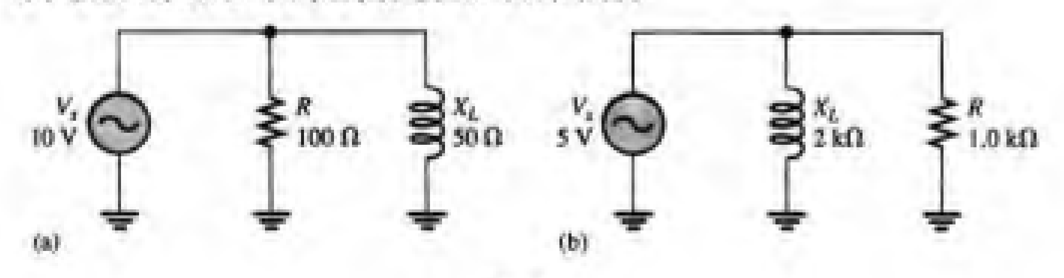


图 17.13

解:对于图 17.13(a)中的电路,总阻抗为:

$$Z=\left(\frac{RX_L}{\sqrt{R^2+X_L^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right)$$
$$=\left(\frac{(100\ \Omega)(50\ \Omega)}{\sqrt{(100\ \Omega)^2+(50\ \Omega)^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{50\ \Omega}\right)=44.7\angle 63.4^\circ\ \Omega$$

因此,$Z=\mathbf{44.7\ \Omega}$,且 $\theta=\mathbf{63.4^\circ}$。

对于图 17.13(b)中的电路,总阻抗为:

$$Z=\left(\frac{(1.0\ k\Omega)(2\ k\Omega)}{\sqrt{(1.0\ k\Omega)^2+(2\ k\Omega)^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.0\ k\Omega}{2\ k\Omega}\right)=894\angle 26.6^\circ\ \Omega$$

因此,$Z=\mathbf{894\ \Omega}$,且 $\theta=\mathbf{26.6^\circ}$。

由此可看出,正的相角表示电压超前于电流,与 RC 电路中电压滞后于电流的情况相反。

练习:在并联电路中,$R=10\ k\Omega$ 且 $X_L=14\ k\Omega$。试求极坐标形式的总阻抗。

17.4.1 电导、电纳和导纳

从上一章我们已经知道,电导(G)是电阻的倒数,电纳(B)是电抗的倒数,而导纳(Y)是阻抗的倒数。

对于并联 RL 电路,感性电纳(B_L)的相量表达式为:

$$\mathbf{B}_L=\frac{1}{X_L\angle 90^\circ}=B_L\angle-90^\circ=-jB_L \tag{17.14}$$

导纳的相量表达式为:

$$\mathbf{Y}=\frac{1}{Z\angle\pm\theta}=Y\angle\mp\theta \tag{17.15}$$

基本并联 RL 电路如图 17.14 所示,总导纳是电导和感性电纳的相量和。

$$\mathbf{Y}=G-jB_L \tag{17.16}$$

如同 RC 电路,电导(G)、电纳(B_L)和导纳(Y)的单位是西门子(S)。

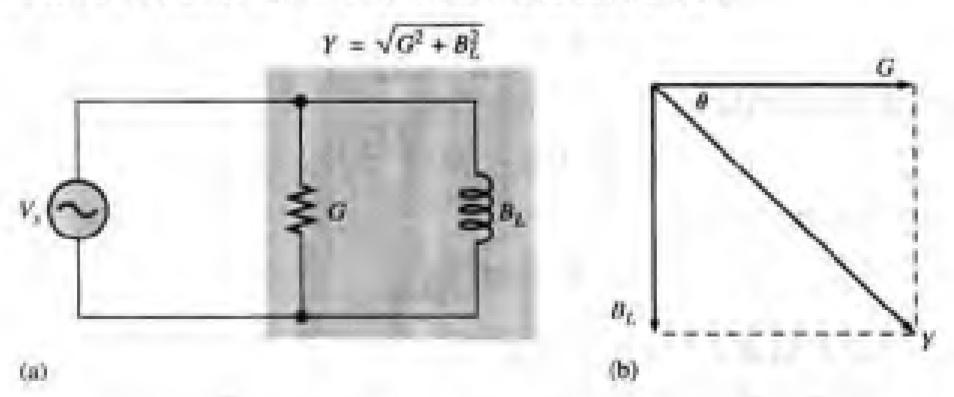


图 17.14 并联 RL 电路的导纳

例 17.5 电路如图 17.15 所示,试求总阻抗和总导纳是多少?画出导纳相量图。

解:首先,求电导的大小。$R=330\ \Omega$,因此,

$$G=\frac{1}{R}=\frac{1}{330\ \Omega}=3.03\ mS$$

接着,试求感性电抗。

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1000\ \text{Hz})(100\ \text{mH}) = 628\ \Omega$$

感性电纳的大小为：

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{628\ \Omega} = 1.59\ \text{mS}$$

总导纳为：

$$\mathbf{Y}_{tot} = G - jB_L = 3.03\ \text{mS} - j1.59\ \text{mS}$$

用极坐标形式可以表示为：

$$\mathbf{Y}_{tot} = \sqrt{G^2 + B_L^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{B_L}{G}\right)$$
$$= \sqrt{(3.03\ \text{mS})^2 + (1.59\ \text{mS})^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{1.59\ \text{mS}}{3.03\ \text{mS}}\right) = \mathbf{3.42\angle -27.7^\circ\ mS}$$

总导纳转换为总阻抗：

$$\mathbf{Z}_{tot} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{tot}} = \frac{1}{3.42\angle -27.7^\circ\ \text{mS}} = \mathbf{292\angle 27.7^\circ\ \Omega}$$

该例再一次说明，阻抗表达式中正的相角表示电压超前于电流。导纳相量图如图 17.16 所示。

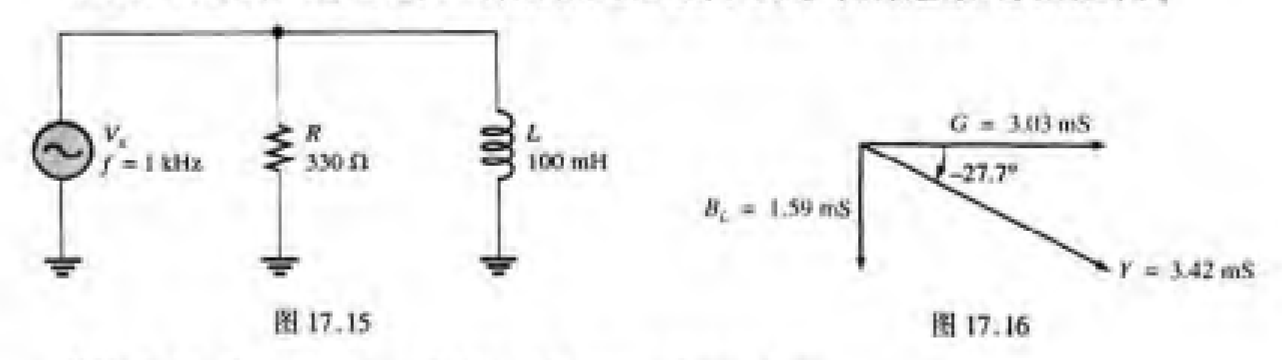


图 17.15　　图 17.16

练习：电路如图 17.15 所示，如果 f 增加到 2 kHz，总导纳是多少？

17.4 节练习

1. 如果 $Z = 500\ \Omega$，那么 Y 的值是多少？
2. 某个并联 RL 电路中，$R = 47\ \Omega$，$X_L = 75\ \Omega$，试求导纳的值。
3. 上题中，总电流是超前还是滞后于输入电压？相角是多少？

17.5　并联 RL 电路的分析

在上一节中，我们已经介绍了如何表示并联 RL 电路的阻抗。本节将欧姆定律和基尔霍夫电流定律用于分析 RL 电路，阐述并联 RL 电路中电流和电压的关系。

学完本节，读者应该能够：

- 分析并联 RL 电路
- 应用欧姆定律和基尔霍夫电流定律分析并联 RL 电路
- 用相量表示电压和电流

下面举例说明应用欧姆定律分析并联 RL 电路。

例 17.6　电路如图 17.17 所示，试求总电流和相角。画出 V_s 和 I_{tot} 关系的相量图。

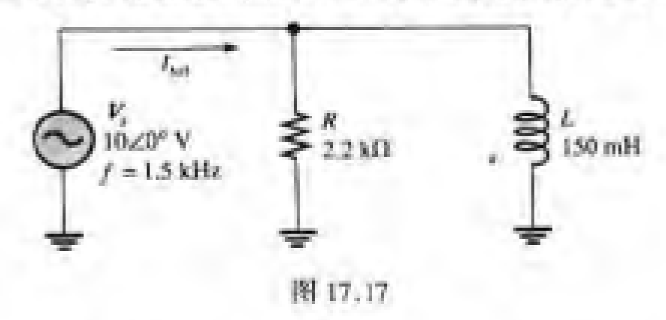


图 17.17

解：感性电抗为：

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1.5\ \text{kHz})(150\ \text{mH}) = 1.41\ \text{k}\Omega$$

感性电纳值为：

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{1.41\ \text{k}\Omega} = 709\ \mu\text{S}$$

电导为：

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{2.2\ \text{k}\Omega} = 455\ \mu\text{S}$$

总导纳为：

$$\mathbf{Y}_{tot} = G - jB_L = 455\ \mu\text{S} - j709\ \mu\text{S}$$

转换为极坐标形式为：

$$\mathbf{Y}_{tot} = \sqrt{G^2 + B_L^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{B_L}{G}\right)$$

$$= \sqrt{(455\ \mu\text{S})^2 + (709\ \mu\text{S})^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{709\ \mu\text{S}}{455\ \mu\text{S}}\right) = 842\angle -57.3^\circ\ \mu\text{S}$$

相角为 $-57.3°$。

由欧姆定律可求得总电流为：

$$\mathbf{I}_{tot} = \mathbf{V}_s\mathbf{Y}_{tot} = (10\angle 0^\circ\ \text{V})(842\angle -57.3^\circ\ \mu\text{S}) = \mathbf{8.42\angle -57.3^\circ\ mA}$$

总电流的模为 8.42 mA，负的相角说明，电流滞后于输入电压的相角为 57.3°。这些关系如图 17.18 中的相量图所示。

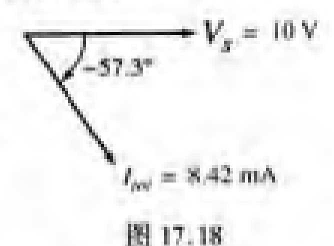


图 17.18

练习：电路如图 17.17 所示，如果 f 减少到 800 Hz，试求电流的极坐标形式。

17.5.1　电流和电压的相量关系

图17.19(a)中标明了基本并联 RL 电路中的所有电流。总电流 I_{tot} 在节点处分成两个支路电流 I_R 和 I_L。输入电压 V_s 同时叠加在电阻和电感支路，因此 V_s，V_R 和 V_L 大小相等，且相位一致。

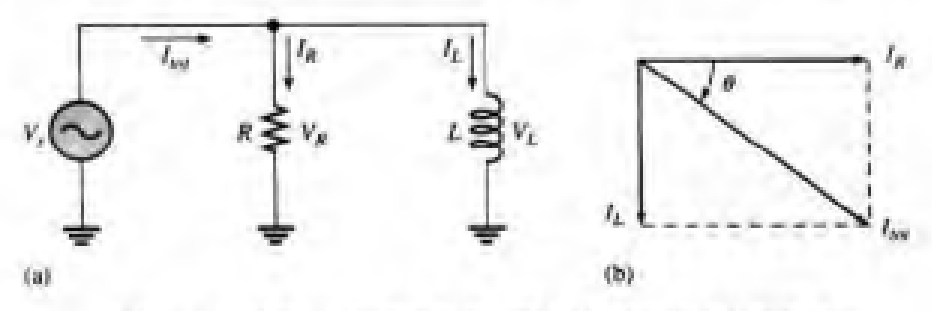


图 17.19　并联 RL 电路的电流。图(a)中的电流方向是瞬时的，当源电压在每个支路上反向时，电流也反向

通过电阻的电流和电压是同相位的，通过电感的电流滞后于电压和电阻的电流 90°。由基尔霍夫电流定律可得，总电流是两个支路电流的相量和，如图 17.19(b)中的相量图所示。总电流表示为：

$$\mathbf{I}_{tot} = I_R - jI_L \tag{17.17}$$

用极坐标形式可以等效表示为：

$$\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{I_L}{I_R}\right) \tag{17.18}$$

其中，总电流的模为：

$$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} \tag{17.19}$$

电阻电流和总电流之间的相角为：

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{I_L}{I_R}\right) \tag{17.20}$$

由于电阻电流和输入电压同相位，因此 θ 同样可以表示为总电流和输入电压之间的相角。图 17.20 表示的是完整的电流和电压的相量图。

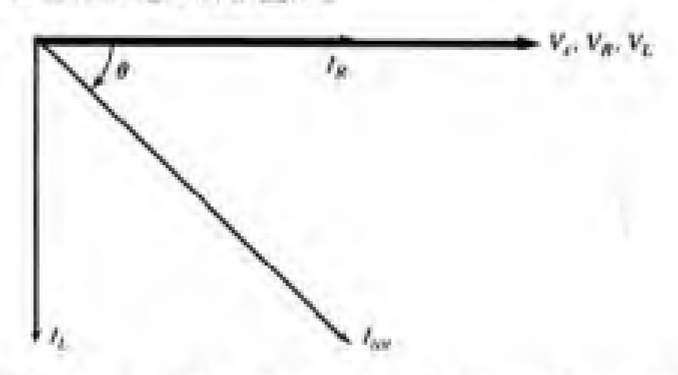


图 17.20 并联 RL 电路中电流和电压的相量图(幅值任意)

例 17.7 电路如图 17.21 所示，试确定每个电流值，并描述每个电流相对于输入电压的相位关系。画出电流相量图。

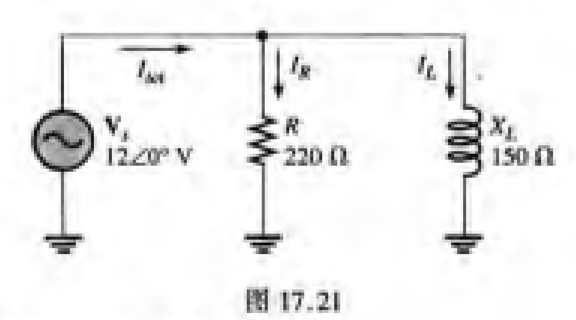


图 17.21

解： 电阻电流、电感电流和总电流分别表示如下：

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{R}} = \frac{12\angle 0°\ \text{V}}{220\angle 0°\ \Omega} = \mathbf{54.5\angle 0°\ mA}$$

$$\mathbf{I}_L = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{X}_L} = \frac{12\angle 0°\ \text{V}}{150\angle 90°\ \Omega} = \mathbf{80\angle -90°\ mA}$$

$$\mathbf{I}_{tot} = I_R - jI_L = 54.5\ \text{mA} - j80\ \text{mA}$$

I_{tot}转换为极坐标形式为:

$$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{I_L}{I_R}\right)$$

$$= \sqrt{(54.5\ \text{mA})^2 + (80\ \text{mA})^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{80\ \text{mA}}{54.5\ \text{mA}}\right) = \mathbf{96.8\angle -55.7°\ mA}$$

以上的结果说明,电阻电流是 54.5 mA,和输入电压是同相位的。电感电流是 80 mA,滞后于输入电压 90°。总电流是 96.8 mA,滞后于电压 55.7°。这些关系如图 17.22 中的相量图所示。

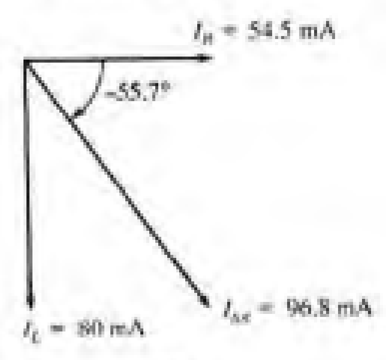


图 17.22

练习:图 17.21 中,如果 X_L = 300 Ω,试求 I_{tot} 的模和相位角分别是多少?

17.5 节练习

1. *RL* 电路的导纳为 4 mS,且输入电压是 8 V,那么总电流是多少?
2. 某个并联 *RL* 电路中,电阻电流是 12 mA,电感电流是 20 mA,试求总电流的模和相位角。该相角是相对哪个量测得的?
3. 在并联 *RL* 电路中,电感电流和输入电压之间的相位角是多少?

第三部分:串 – 并联电抗电路

17.6 串 – 并联 *RL* 电路的分析

在本节中,已介绍过的串联和并联的概念将用于分析 *R* 和 *L* 元件串联和并联都包含的混合电路中。

学完本节,读者应该能够:

- 分析串 – 并联 *RL* 电路
- 确定总阻抗
- 计算电流和电压

下面的两道例题可以说明应该如何结合先前学到的方法来分析串 – 并联 *RL* 网络。

例 17.8 电路如图 17.23 所示,试求下列值:

(a) Z_{tot} (b) I_{tot} (c) θ

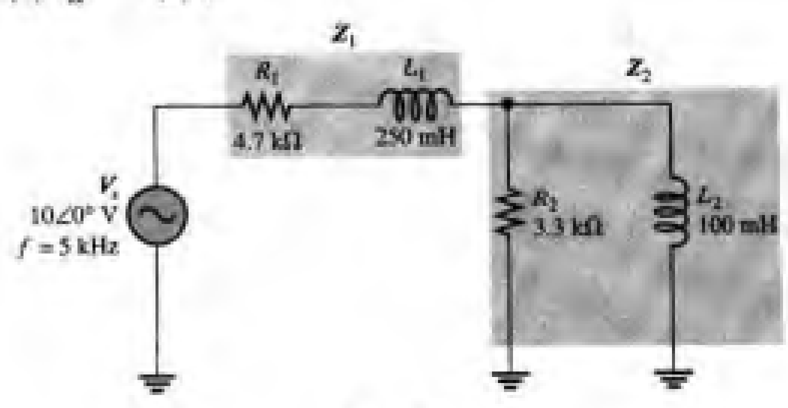


图 17.23

解：(a)首先，计算感性电抗的大小：

$$X_{L1} = 2\pi fL_1 = 2\pi(5\ \text{kHz})(250\ \text{mH}) = 7.85\ \text{k}\Omega$$
$$X_{L2} = 2\pi fL_2 = 2\pi(5\ \text{kHz})(100\ \text{mH}) = 3.14\ \text{k}\Omega$$

一种方法是先求出串联部分的阻抗和并联部分的阻抗，然后合并可以得到总阻抗。R_1 和 L_1 串联部分的阻抗是：

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 + jX_{L1} = 4.7\ \text{k}\Omega + j7.85\ \text{k}\Omega$$

为计算并联部分的阻抗，先求 R_2 和 L_2 并联部分的导纳是：

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{3.3\ \text{k}\Omega} = 303\ \mu\text{S}$$
$$B_{L2} = \frac{1}{X_{L2}} = \frac{1}{3.14\ \text{k}\Omega} = 318\ \mu\text{S}$$
$$\mathbf{Y}_2 = G_2 - jB_L = 303\ \mu\text{S} - j318\ \mu\text{S}$$

转换为极坐标形式为：

$$\mathbf{Y}_2 = \sqrt{G_2^2 + B_{L2}^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{B_{L2}}{G_2}\right)$$
$$= \sqrt{(303\ \mu\text{S})^2 - (318\ \mu\text{S})^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{318\ \mu\text{S}}{303\ \mu\text{S}}\right) = 439\angle -46.4^\circ\ \mu\text{S}$$

那么，并联部分的阻抗为：

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{1}{\mathbf{Y}_2} = \frac{1}{439\angle -46.4^\circ\ \mu\text{S}} = 2.28\angle 46.4^\circ\ \text{k}\Omega$$

转换成直角坐标形式为：

$$\mathbf{Z}_2 = Z_2\cos\theta + jZ_2\sin\theta$$
$$= (2.28\ \text{k}\Omega)\cos(46.4^\circ) + j(2.28\ \text{k}\Omega)\sin(46.4^\circ) = 1.57\ \text{k}\Omega + j1.65\ \text{k}\Omega$$

串联部分和并联部分再相互串联。结合 $\mathbf{Z}_1$ 和 $\mathbf{Z}_2$ 可以得到总阻抗：

$$\mathbf{Z}_{tot} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2$$
$$= (4.7\ \text{k}\Omega + j7.85\ \text{k}\Omega) + (1.57\ \text{k}\Omega + j1.65\ \text{k}\Omega) = 6.27\ \text{k}\Omega + j9.50\ \text{k}\Omega$$

$\mathbf{Z}_{tot}$ 用极坐标形式表示为：

$$\mathbf{Z}_{tot} = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)$$
$$= \sqrt{(6.27\ \text{k}\Omega)^2 + (9.50\ \text{k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{9.50\ \text{k}\Omega}{6.27\ \text{k}\Omega}\right) = \mathbf{11.4\angle 56.6^\circ\ k\Omega}$$

(b)利用欧姆定律可以计算出总电流。

$$\mathbf{I}_{tot} = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_{tot}} = \frac{10\angle 0^\circ\ \text{V}}{11.4\angle 56.6^\circ\ \text{k}\Omega} = \mathbf{877\angle -56.6^\circ\ \mu A}$$

(c)总电流滞后于输入电压 **56.6°**。

练习：(a)图 17.23 所示的电路中，试求通过串联部分的电压。

(b)试求通过电路中并联部分的电压。

例 17.9　如图 17.24 所示，试求通过每个部分的电压，画出电压相量图和电流相量图。

解：首先，计算 X_{L1} 和 X_{L2}。

$$X_{L1} = 2\pi fL_1 = 2\pi(2\ \text{MHz})(50\ \mu\text{H}) = 628\ \Omega$$
$$X_{L2} = 2\pi fL_2 = 2\pi(2\ \text{MHz})(100\ \mu\text{H}) = 1.26\ \Omega$$

接着，求出每条支路的阻抗。

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 + jX_{L1} = 330\ \Omega + j628\ \Omega$$
$$\mathbf{Z}_2 = R_2 + jX_{L2} = 1.0\ \text{k}\Omega + j1.26\ \text{k}\Omega$$

将这些阻抗转换为极坐标形式：

$$\mathbf{Z}_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_{L1}}{R_1}\right)$$
$$= \sqrt{(330\ \Omega)^2 + (628\ \Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{628\ \Omega}{330\ \Omega}\right) = 709\angle 62.3°\ \Omega$$
$$\mathbf{Z}_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_{L2}}{R_2}\right)$$
$$= \sqrt{(1.0\ \text{k}\Omega)^2 + (1.26\ \text{k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.26\ \text{k}\Omega}{1.0\ \text{k}\Omega}\right) = 1.61\angle 51.6°\ \text{k}\Omega$$

计算每条支路的电流。

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_1} = \frac{10\angle 0°\ \text{V}}{709\angle 62.3°\ \Omega} = 14.1\angle -62.3°\ \text{mA}$$
$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_2} = \frac{10\angle 0°\ \text{V}}{1.61\angle 51.6°\ \text{k}\Omega} = 6.21\angle -51.6°\ \text{mA}$$

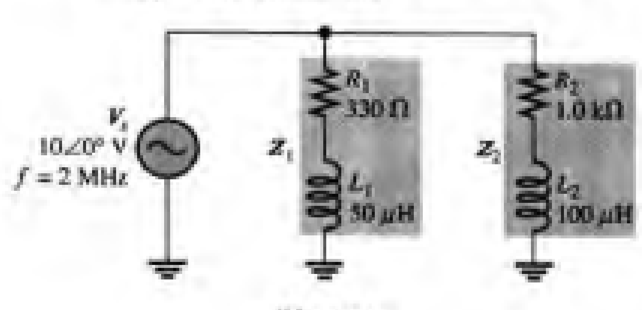


图 17.24

最后，利用欧姆定律可以得到通过每个元件的电压。

$$\mathbf{V}_{R1} = \mathbf{I}_1\mathbf{R}_1 = (14.1\angle -62.3°\ \text{mA})(330\angle 0°\ \Omega) = \mathbf{4.65\angle -62.3°\ V}$$
$$\mathbf{V}_{L1} = \mathbf{I}_1\mathbf{X}_{L1} = (14.1\angle -62.3°\ \text{mA})(628\angle 90°\ \Omega) = \mathbf{8.85\angle 27.7°\ V}$$
$$\mathbf{V}_{R2} = \mathbf{I}_2\mathbf{R}_2 = (6.21\angle -51.6°\ \text{mA})(1\angle 0°\ \text{k}\Omega) = \mathbf{6.21\angle -51.6°\ V}$$
$$\mathbf{V}_{L2} = \mathbf{I}_2\mathbf{X}_{L2} = (6.21\angle -51.6°\ \text{mA})(1.26\angle 90°\ \text{k}\Omega) = \mathbf{7.82\angle 38.4°\ V}$$

电压相量图如图 17.25 所示，电流相量图如图 17.26 所示。

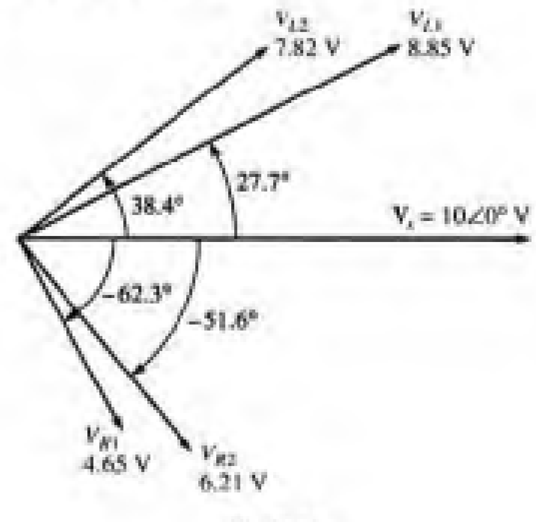


图 17.25

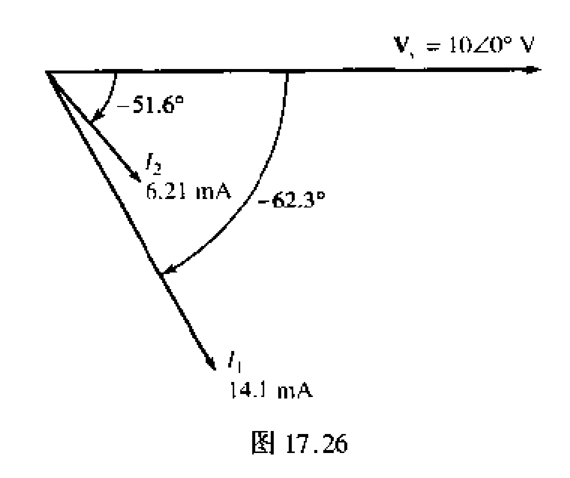


图 17.26

练习:图 17.24 中总电流的极坐标形式是什么?

17.6 节练习

1. 图 17.24 所示的电路中,总阻抗的极坐标形式是什么?
2. 图 17.24 所示的电路中,总电流的极坐标形式是什么?

第四部分:专题讨论

17.7 RL 电路中的功率

在交流纯电阻电路中,由电源提供给电路的所有能量,都被电阻以热能的形式消耗掉。在交流纯电感电路中,由电源提供给电路的所有能量,在电压周期的某一时段,存储于电感的磁场中,而在电压周期的其他时刻会再流出,送回电源。其存储和返回的过程中,没有能量转化为热能。电路中既有电阻又有电感时,一部分能量通过电感交替进行存储和返回,另一部分能量则被电阻消耗。输入能量转化为热能的多少取决于电阻阻抗和电感电抗的相对值。

学完本节,读者应该能够:

- 确定 *RL* 电路的功率
- 解释有功和无功功率
- 画出功率三角形
- 论述功率因数

电阻阻抗大于电感电抗时,由电源输入的总能量中的大部分通过电阻转化为热能,而只有少部分存储于电感之中。同样,电感电抗大于电阻阻抗时,总能量中存储和返还的部分大于转换为热能的部分。

我们已经学过,电阻上的功率损耗称为有功功率。而电感上的功率称为无功功率,表达式如下:

$$P_r = I^2X_L \tag{17.21}$$

17.7.1 RL 电路的功率三角形

RL 电路的功率三角形归纳后如图 17.27 所示,视在功率 P_a 是由平均功率 P_{true}和无功功率 P_r 合成的。

仔细回想一下，功率因数等于 θ 角的余弦值（$PF=\cos\theta$）。随着输入电压与总电流之间相位差的增大，功率因数减小，说明电路电抗增加。较小的功率因数意味着较小的有功功率和较大的无功功率。

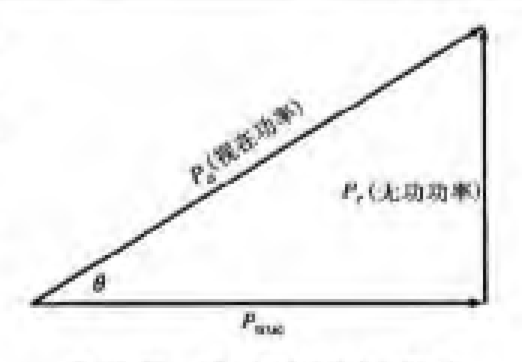


图 17.27　RL 电路的功率三角形

例 17.10　试确定图 17.28 中的功率因数、有功功率、无功功率和视在功率。

解：电路总阻抗的直角坐标形式表示如下：

$$\boldsymbol{Z}=R+jX_L=1.0\ \text{k}\Omega+j2\ \text{k}\Omega$$

转换为极坐标形式如下：

$$\boldsymbol{Z}=\sqrt{R^2+X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

$$=\sqrt{(1.0\ \text{k}\Omega)^2+(2\ \text{k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{2\ \text{k}\Omega}{1.0\ \text{k}\Omega}\right)=2.24\angle63.4^\circ\ \text{k}\Omega$$

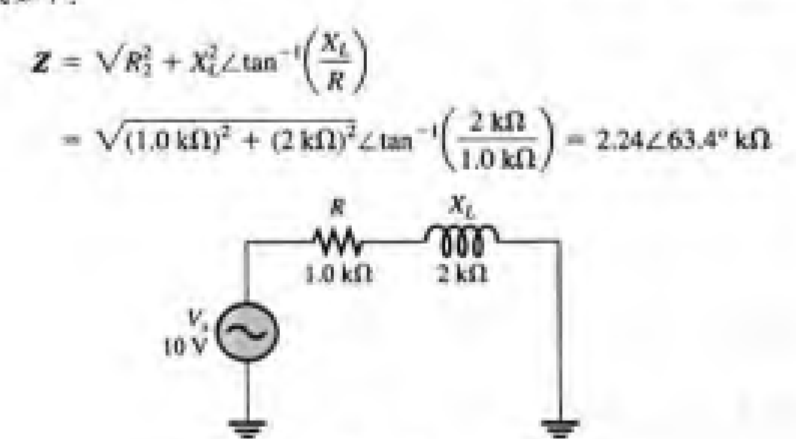


图 17.28

电流的大小为：

$$I=\frac{V_s}{Z}=\frac{10\ \text{V}}{2.24\ \text{k}\Omega}=4.46\ \text{mA}$$

由 Z 的表达式中可以看出相角为：

$$\theta=63.4^\circ$$

因此，功率因数为：

$$PF=\cos\theta=\cos(63.4^\circ)=\mathbf{0.448}$$

有功功率为：

$$P_{true}=V_sI\cos\theta=(10\ \text{V})(4.46\ \text{mA})(0.448)=\mathbf{20\ mW}$$

无功功率为：

$$P_r=I^2X_L=(4.46\ \text{mA})^2(2\ \text{k}\Omega)=\mathbf{39.8\ mVAR}$$

视在功率为：

$$P_a=I^2Z=(4.46\ \text{mA})^2(2.24\ \text{k}\Omega)=\mathbf{44.6\ mVA}$$

练习：如果图 17.28 中的频率上升，则 P_{true}、P_r 和 P_a 将如何变化？

17.7.2　功率因数的意义

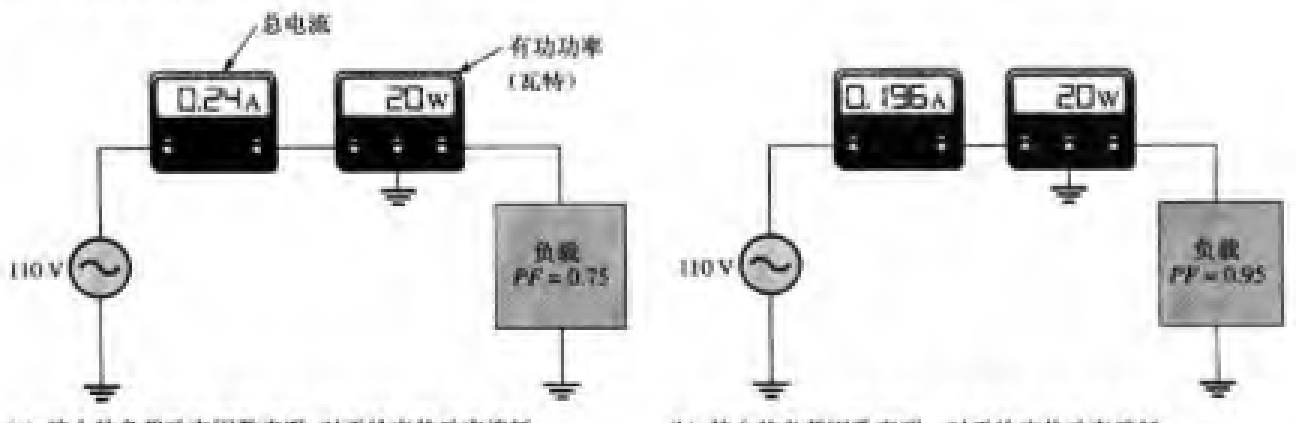
在第 16 章中已经介绍过，功率因数（PF，power factor）在确定有多少有功功率（有效功率）转换方面是非常重要的。当负载的总电流与电压同相位（纯阻性）时，功率因数达到最大值 1。当功率因数为 0 时，负载总电流与电压的相位差为 90°（纯电抗性）。

通常希望功率因数越接近 1 越好，这是因为功率因数越大，电源和负载间的功率转移中的

有功功率就越多。有功功率只有一种转移路径：从电源到负载，在负载端以消耗能量的方式作功。无功功率只是简单地在电源与负载间往返不作功，其净功为零，能量用来作功。

很多实际负载由于其特定功能而具有感性，并且成为这些负载正常工作的基础。例如变压器、电动机、扬声器，等等。因此，电感性（电容性）负载是重要的考虑因素。

从图 17.29 中可以看出系统配置中功率因数的影响。图中所示的典型感性负载是由有效电感和电阻并联构成的。图 17.29(a)中的负载功率因数相对较低(0.75)，图 17.29(b)中的负载功率因数相对较高(0.95)。通过图中瓦特表的示数可以看出两个负载所消耗的功率相等。因此，两个负载所作的功相等。



(a) 较小的负载功率因数表明，对于给定的功率消耗（瓦特），有较大的总电流。需要较大的电源额定视在功率来传递有功功率（瓦特）

(b) 较大的负载因数表明，对于给定的功率消耗（瓦特），总电流较小。较小的电源额定视在功率即可传递相同的有功功率

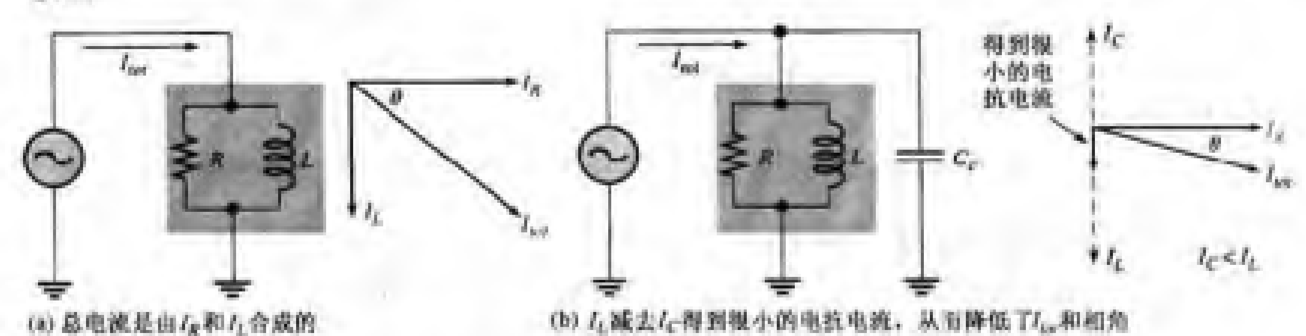
图 17.29 系统配置[如电源额定功率(伏安)和导线尺寸等]中功率因数的影响

尽管在作功(有功功率)方面两个负载是等效的，但图 17.29(a)(负载功率因数较小)中的安培表所显示的读数要大于图 17.29(b)(负载功率因数较大)中的电流示数。因此，图 17.29(a)中的电源比图 17.29(b)中的有较高的额定视在功率。同时，图 17.29(a)中连接电源和负载的导线尺寸规格必定要大于图 17.29(b)中的。这在需要较长传输线的情况下是非常重要的，例如配电系统。

图 17.29 说明功率因数越高，越有利于功率的有效传输。

17.7.3 改善功率因数

如图 17.30 所示，通过并联一个额外的电容，感性负载的功率因数可以增加。电容补偿应用于总电流相位滞后的情况，是通过添加一个容性元件，且使通过该容性元件的电流与通过感性元件的电流相位相差 180°来实现的。如图中所示，这里有一个抵消作用，减小了相角以及总电流。



(a) 总电流是由 I_R 和 I_L 合成的

(b) I_L 减去 I_C 得到很小的电抗电流，从而降低了 I_{tot} 和相角

图 17.30 通过额外的补偿电容可以提高功率因数

17.7 节练习

1. RL 电路中的哪个元件有功率损耗?
2. 当 $\theta = 50°$时计算功率因数。
3. 由阻抗为 470 Ω 的电阻和感抗为 620 Ω 的电感组成的某 RL 电路，在一定的工作频率下当 $I = 100$ mA 时，试确定 P_{true}，P_r 和 P_a。

17.8 基本应用

本节将讨论 RL 电路的两种基本应用:在移相网络中的应用和在选频网络(滤波器)中的应用。学完本节后，读者应该能够：

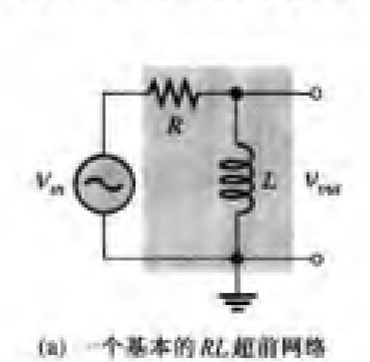
- 论述一些基本 RL 电路的应用
- 论述和分析 RL 超前网络
- 论述和分析 RL 滞后网络
- 论述作为滤波器使用的 RL 电路的工作原理

17.8.1 RL 超前网络

RL 超前网络是一个移相电路，该电路的输出电压超前于输入电压某一指定数值。图 17.31(a)表示一个串联 RL 电路，该电路的输出电压取自电感两端。注意，在 RC 超前网络中，输出电压是取自电阻两端的。电源为电路提供输入电压 V_{in}。已知 θ 是电流与输入电压之间的相位差，也是电阻上的电压与输入电压之间的相位差，这是因为 V_R 和 I 同相。

如图 17.31(b)所示，由于 V_L 超前 V_R 的相角为 90°，电感上的电压与输入电压之间的相位差则为$90° - \theta$。电感电压作为输出电压，且超前于输入电压，因而构成了一个基本超前网络。

将超前网络中输入/输出电压的波形显示在示波器上，两个波形的关系如图 17.32 所示。输入与输出之间的相位差用ϕ表示，其大小取决于电感电抗与电阻的相对值，就像输出电压的大小也取决于电感电抗与电阻的相对值一样。



(a) 一个基本的 RL 超前网络

(b) 电压相量图显示 V_{out} 超前于 V_{in}

图 17.31 RL 超前网络($V_{out} = V_L$)

图 17.32 输入和输出电压波形

输入与输出之间的相位差 用ϕ表示 V_{in} 和 V_{out} 之间的相位差，其公式推导如下。输入电压与电流的极坐标表示形式分别为 $V_{in}\angle 0°$和 $I\angle -\theta$。输出电压的极坐标表示如下：

$$V_{out} = (I\angle -\theta)(X_L\angle 90°) = IX_L\angle(90° - \theta)$$

可见，输出电压与输入电压的相位差为 $90° - \theta$。由于 $\theta = \tan^{-1}(X_L/R)$，因此输入与输出电压的相位差 ϕ 为：

$$\phi = 90° - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{17.22}$$

同样，相位差也可以表示为：

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right) \tag{17.23}$$

输入与输出间的相位差 ϕ 通常为正值，表明输出电压超前输入电压，如图 17.33 所示。

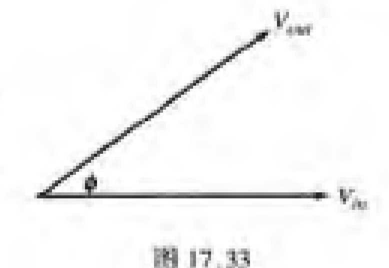


图 17.33

例 17.11 图 17.34 的超前网络中，试确定输入和输出间的相位差。

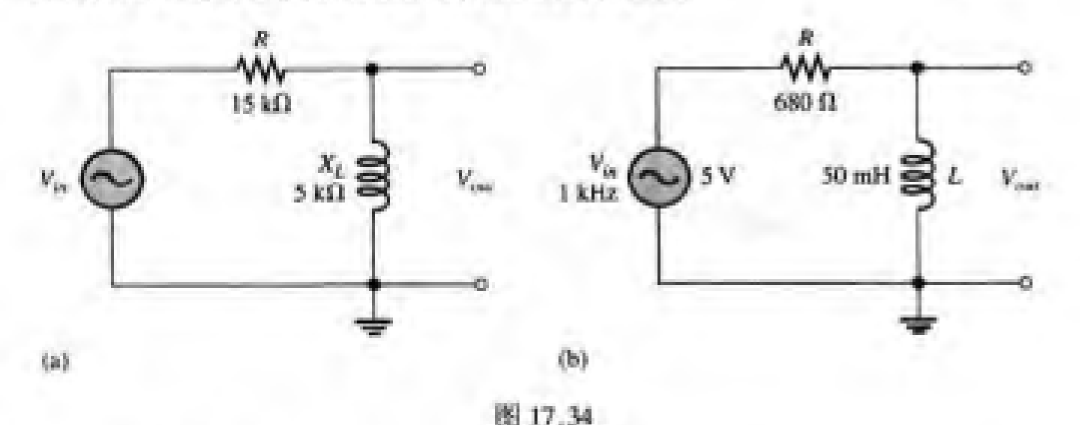


图 17.34

解：参照图 17.34(a) 中的超前网络，

$$\phi = 90° - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) = 90° - \tan^{-1}\left(\frac{5\ \text{k}\Omega}{15\ \text{k}\Omega}\right) = 90° - 18.4° = \mathbf{71.6°}$$

输出电压超前输入电压 71.6°。

参照图 17.34(b) 中的超前网络，首先可以确定电感电抗：

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1\ \text{kHz})(50\ \text{mH}) = 314\ \Omega$$

$$\phi = 90° - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) = 90° - \tan^{-1}\left(\frac{314\ \Omega}{680\ \Omega}\right) = \mathbf{65.2°}$$

输出电压超前输入电压 65.2°。

练习：某超前网络中，若 $R = 2.2\ \text{k}\Omega$ 且 $X_L = 1\ \text{k}\Omega$，试确定输入电压与输出电压间的相位差。

输出电压的大小 根据输出电压的大小，可以将 RL 超前网络看做一种分压器。在总输入电压中，电阻分去了其中一部分电压，而电感分去了另一部分电压。由于输出电压是在电感两端的，故可以用下式计算：

$$V_{out} = \left(\frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in} \tag{17.24}$$

应用欧姆定律，输出电压也可以表示为：

$$V_{out} = IX_L \tag{17.25}$$

RL 超前网络的输出电压总相量表示为：

$$\mathbf{V}_{out} = V_{out}\angle\phi \tag{17.26}$$

例 17.12 图 17.34(b)(参见例 17.11)所示的超前网络中,当输入电压的有效值为 5 V 时,试用相量形式表示其输出电压,画出输入和输出电压波形,并标出其峰值。电感电抗 X_L(314 Ω)和 ϕ(65.2°)均取自例 17.11。

解:输出电压的相量形式为:

$$\boldsymbol{V}_{out} = \left(\frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in}\angle\phi$$
$$= \left(\frac{314\ \Omega}{\sqrt{(680\ \Omega)^2 + (314\ \Omega)^2}}\right)5\angle 65.2°\ \text{V} = \mathbf{2.10\angle 65.2°\ V}$$

电压的峰值为:

$$V_{in(p)} = 1.414V_{in(rms)} = 1.414(5\ \text{V}) = 7.07\ \text{V}$$
$$V_{out(p)} = 1.414V_{out(rms)} = 1.414(2.10\ \text{V}) = 2.97\ \text{V}$$

波形及其峰值如图 17.35 所示,注意输出电压超前输入电压 65.2°。

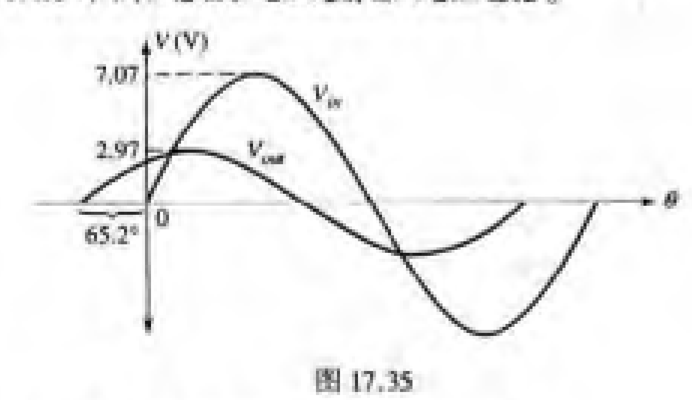
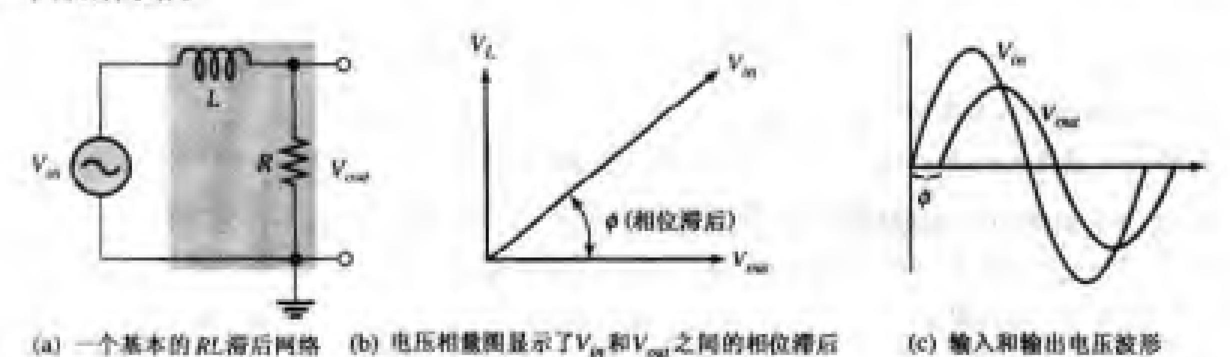


图 17.35

练习:一个超前网络中,当频率上升时,输出电压是上升还是下降?

17.8.2 RL 滞后网络

RL 滞后网络是一个移相电路,该电路的输出电压滞后于输入电压某一指定数值。在 *RL* 串联电路中,如果输出电压取自电阻两端,而不是取自电感两端,如图 17.36(a)所示,这时就构成一个滞后网络。



(a) 一个基本的 *RL* 滞后网络　(b) 电压相量图显示了 V_{in} 和 V_{out} 之间的相位滞后　(c) 输入和输出电压波形

图 17.36 *RL* 滞后网络($V_{out} = V_R$)

输入和输出间的相位差　在串联 *RL* 电路中,电流滞后于输入电压。如图 17.36(b)中的相量图所示,由于输出电压从电阻两端测得,故输出电压滞后于输入电压,其波形图如图 17.36(c)所示。

与超前网络类似,输入电压与输出电压之间的相位差值以及输出电压的大小都取决于电阻

阻抗与电感电抗的相对值。以输入电压的相位为参考相位0°时，输出电压与输入电压的相位差(φ)就等于 θ，这是由于电阻电压(输出电压)与电流同相位。输入和输出间的相位差表示如下：

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{17.27}$$

这个相角总是为负值是由于输出电压滞后于输入电压。

例 17.13　图 17.37 中，计算各电路中的输出相角。

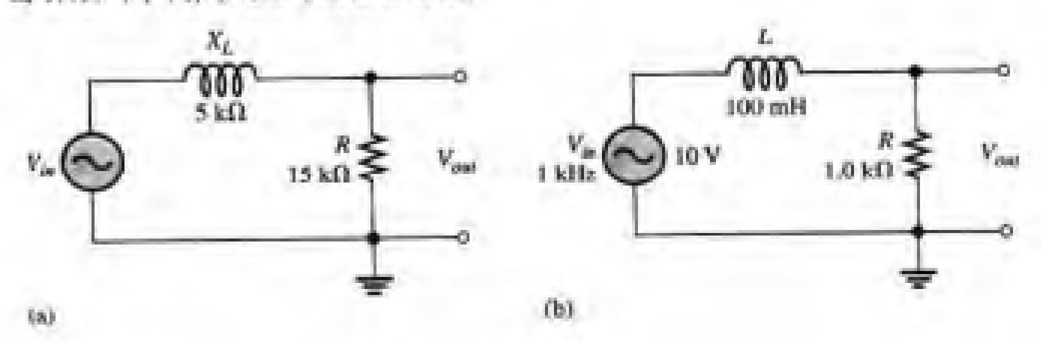


图 17.37

解：参照图 17.37(a)中的滞后网络，

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{5\text{ k}\Omega}{15\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{-18.4°}$$

输出滞后输入 18.4°。

参照图 17.37(b)中的滞后网络，首先可以确定电感电抗：

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 628\ \Omega$$

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{628\ \Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{-32.1°}$$

输出滞后输入 32.1°。

练习：某滞后网络中，若 $R = 5.6$ kΩ，且 $X_L = 3.5$ kΩ，试确定其相角。

输出电压的大小　由于 RL 滞后网络的输出电压取自电阻两端，所以既可以用分压公式，也可以用欧姆定律来计算输出电压的大小。

$$V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in} \tag{17.28}$$

$$V_{out} = IR \tag{17.29}$$

输出电压的相量表示为：

$$\mathbf{V}_{out} = V_{out}\angle -\phi \tag{17.30}$$

例 17.14　图 17.37(b)(参见例 17.13)中，输入电压的有效值为 10 V。试用相量形式表示其输出电压，并画出输入和输出电压波形。相角(−32.1°)和 X_L(628 Ω)均取自于例 17.13。

解：输出电压的相量表示为：

$$\mathbf{V}_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in}\angle\phi = \left(\frac{1.0\text{ k}\Omega}{1181\ \Omega}\right)10\angle -32.1°\text{ V} = \mathbf{8.47\angle -32.1°\ V\ rms}$$

输入/输出波形参见图 17.38。

练习：一个滞后网络中，若 $R = 4.7$ kΩ，$X_L = 6$ kΩ，且输入电压的有效值为 20 V，则输出电压是多少？

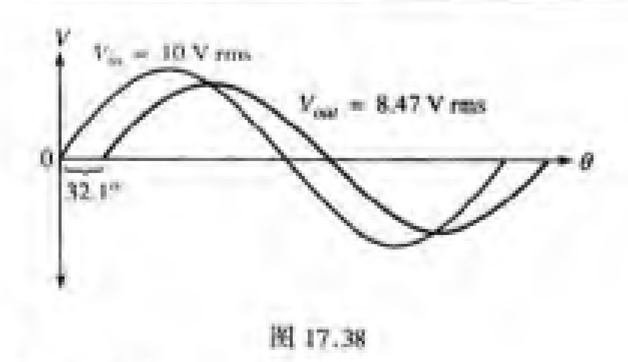


图 17.38

17.8.3 用于滤波的 *RL* 电路

与 *RC* 电路相同，串联 *RL* 电路也具有频率选择特性，因而可作为简单的滤波器。这里只是将滤波器作为应用实例来介绍，更深入的内容参见第 19 章。

低通滤波器 在滞后网络中，已经对低通滤波器输出值的大小和相移有所探讨。就滤波器的功能而言，随着频率的变化，确定其输出电压如何变化是最重要的。

如图 17.39 所示，为了进一步说明 *RL* 串联电路的滤波作用，我们选取一些特殊信号作为输入。图 17.39(a)中，输入电压的频率为零(直流)，由于电感对于直流来说在理想状态下相当于短路，因此输出电压完全等于输入电压(忽略绕组的电阻)。此时，电路允许所有的输入信号到达输出端(10 V 输入，10 V 输出)。

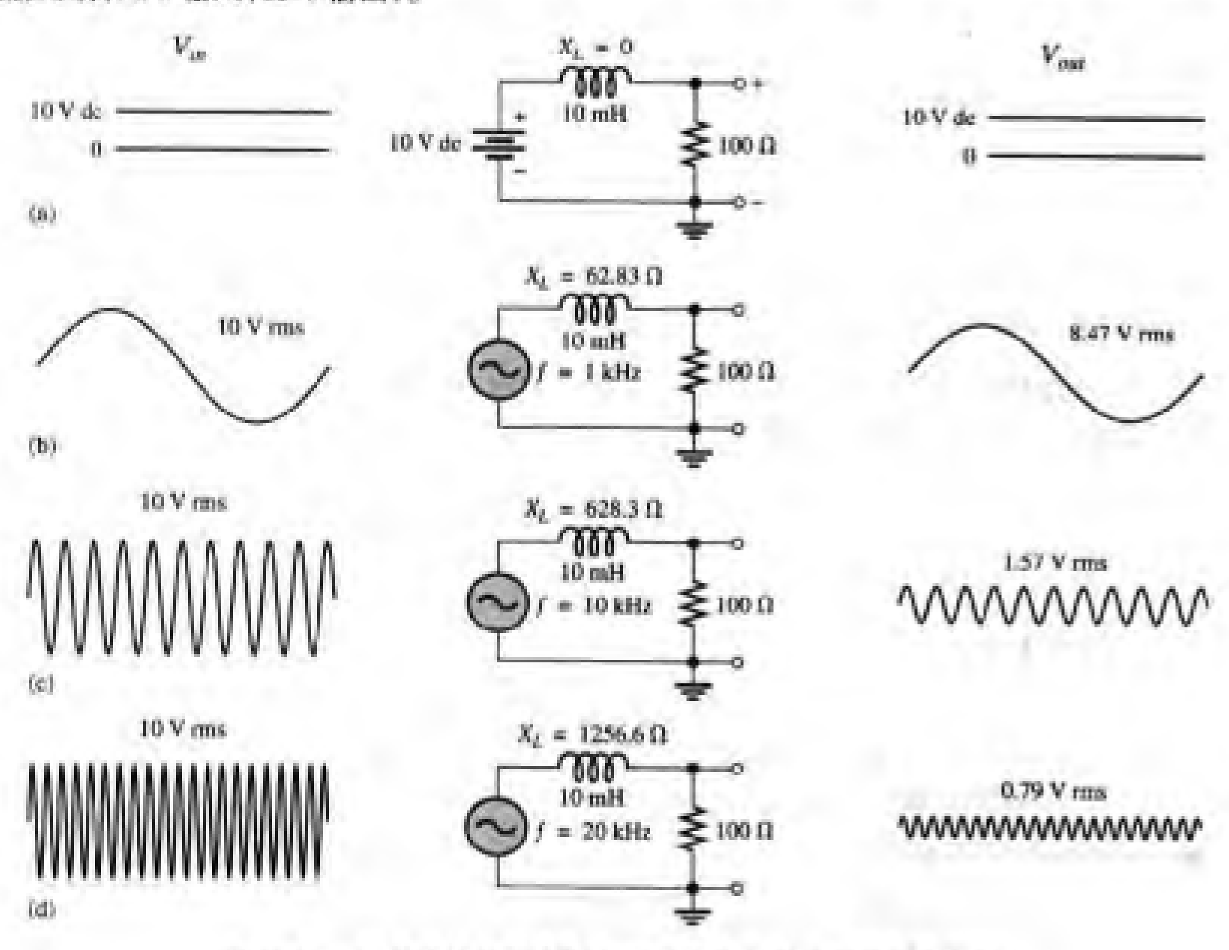


图 17.39 *RL* 低通滤波器的作用(不考虑输入/输出间的相位变化)

图 17.39(b)中，输入电压的频率增加到 1 kHz，导致电感电抗上升为 62.83 Ω。对于有效值为 10 V 的输入电压，根据分压公式或欧姆定律，输出电压的有效值近似为 8.47 V rms。

图 17.39(c)中，输入电压的频率增加到 10 kHz，导致电感电抗进一步上升为 628.3 Ω。对于有效值为 10 V 的输入电压，输出电压的有效值变为 1.57 V rms。

输入电压频率进一步增加时，输出电压继续减小，直到输入电压频率增加到非常高时，输出电压近似为零，图 17.39(d)所示为 $f = 20$ kHz 时的电路波形。

电路的上述作用描述如下：随着输入频率的增加，感抗增加。由于电阻不变而感抗增加，根据分压原理，电感两端的电压增加，且电阻两端的电压(输出电压)将随之减小。当输入频率增加到某一个值时，电抗远远大于电阻，输出电压变得非常小，以至于与输入电压相比可以忽略不计。

如图 17.39 所示，电路允许直流(频率为零)完全通过。随着输入频率的增加，只有一少部分的输入电压通过电路到达输出端，也就是随着频率的增加，输出电压减小。表现为低频信号比高频信号更容易通过电路。因此，这种 *RL* 电路是一种简单的低通滤波器。

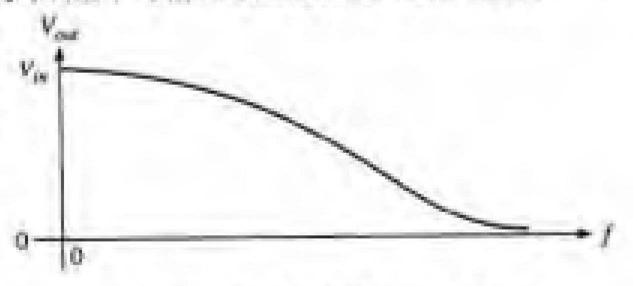


图 17.40 低通滤波器频率响应曲线

图 17.40 所示为一个低通滤波器的频率响应曲线。

高通滤波器 高通滤波器的作用如图 17.41 所示，图中的输出电压取自电感两端。当输入电压是直流(频率为零)时，如图 17.41(a)所示，由于理想状态下电感相当于将输出端短路，使输出电压为 0 V。

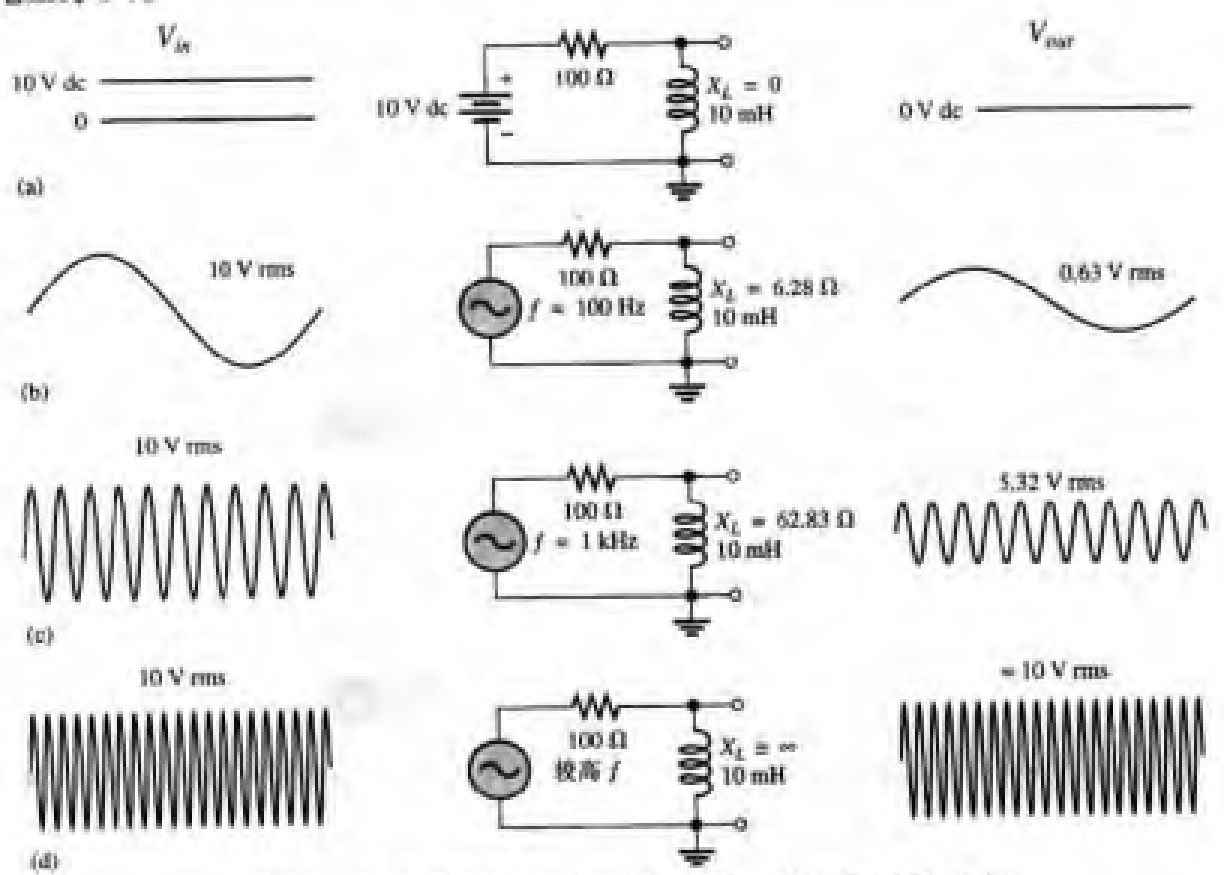


图 17.41 *RL* 高通滤波器的作用(不考虑输入/输出间的相位变化)

在图 17.41(b)中,输入电压的有效值为 10 V。当输入信号的频率增加到 100 Hz 时,输出电压的有效值为 0.63 V rms。这样,只有很小部分的输入电压到达输出端。

在图 17.41(c)中,当频率进一步增加到 1 kHz 时,由于感抗的增加使得两端的电压增大,这时,输出电压的有效值为 5.32 V rms。可见随着频率的增加,输出电压增加。当频率增加到某一数值时,电抗远远大于阻抗,输入电压几乎全部加到电感上,如图 17.41(d)所示。

由上述图示可知,该电路倾向于阻止低频输入信号到达输出端,而允许高频信号从输入到达输出。因此,这是一种简单的高通滤波器。

高通滤波器的频率响应曲线如图 17.42 所示。从图中可以看出,随着频率的增加,输出电压也随着增加,直到接近输入电压时,曲线趋于水平。

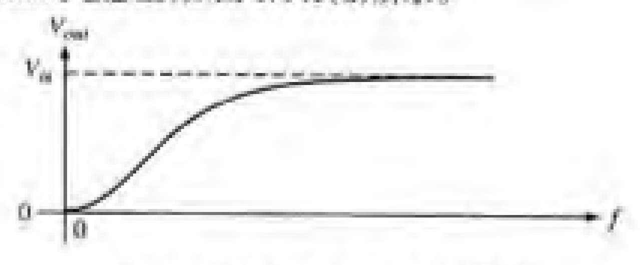


图 17.42　高通滤波器频率响应曲线

17.8 节练习

1. 某 *RL* 超前网络的电阻为 3.3 kΩ,电感为 15 mH。求频率为 5 kHz 时,输入与输出之间的相移。
2. 某 *RL* 滞后网络中的电路元件与第 1 题相同。求输入电压的有效值为 10 V,频率为 5 kHz 时,输出电压的大小。
3. *RL* 电路作为低通滤波器时,输出电压应取自哪个元件的两端?

17.9　故障检修

本节将讨论基本 *RL* 电路中,由于典型元件故障所产生的影响。

学完本节后,读者应该能够:

- 检修 *RL* 电路
- 找出开路电感
- 找出短路电阻
- 找出并联电路中的断路部分

17.9.1　开路电感的影响

通常电流过大或机械连接故障会导致线圈开路,这是电感元件最常见的故障模式。如图 17.43 所示,很容易看出开路线圈对于基本串联 *RL* 电路的影响。显然,电路中没有电流流通路径,所以电阻器电压为零,从而使总电源电压都降在电感的两端。如果怀疑线圈开路,可以从电路中移除一根或两根导线,并利用欧姆表检查线圈的连通情况。

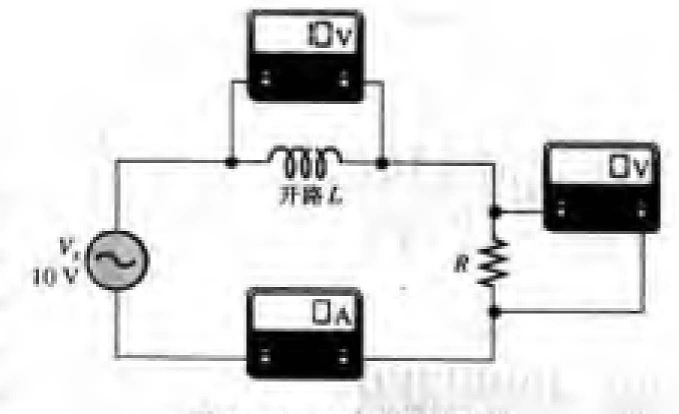


图 17.43　开路线圈的影响

17.9.2 开路电阻的影响

电阻开路时电路中没有电流，且电感电压为 0 V。总的输入电压全部加在开路电阻的两端，如图 17.44 所示。

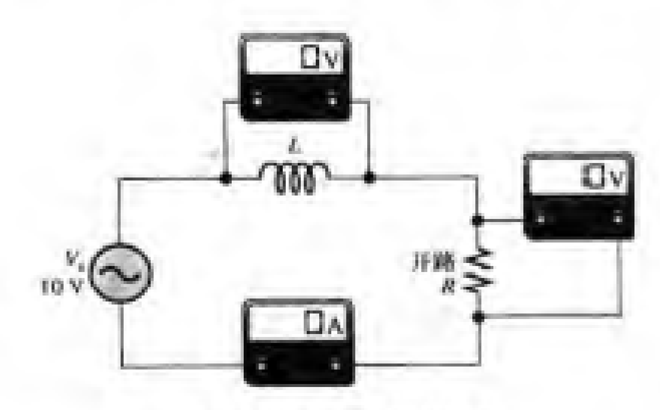


图 17.44　开路电阻的影响

17.9.3 并联电路中的开路元件

在一个并联的 RL 电路中，电阻或电感的开路将会导致总阻抗的增加，进而致使总电流减少。显然，含有开路元件的支路中没有电流通过。图 17.45 说明了这些情况。

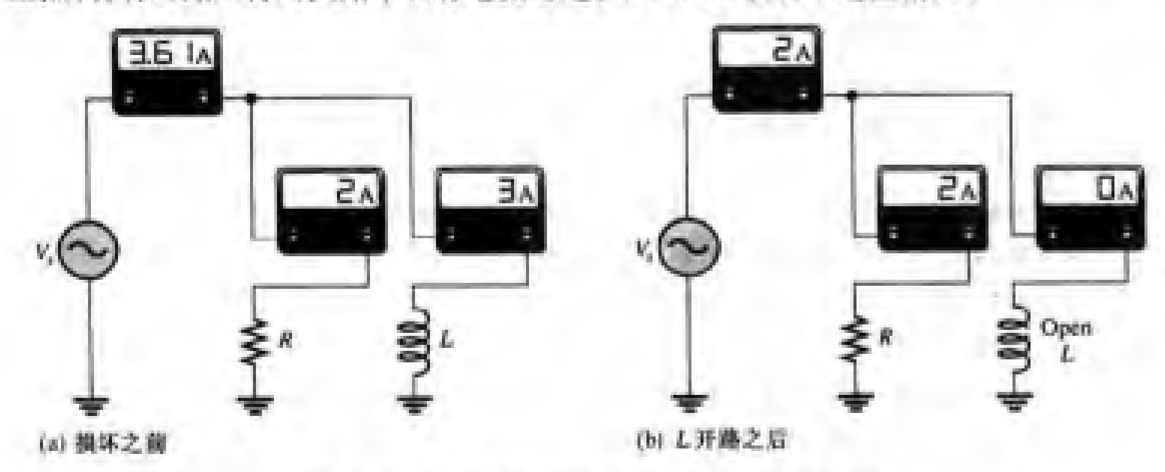


图 17.45　V_s 恒定时并联电路中开路元件的影响

17.9.4 电感中绕组短路的影响

尽管很少出现，但由于绝缘的损坏造成电感线圈绕组间短接的可能性仍然存在。这种故障情况相对于电感开路来说是很少发生的，且很难检测。绕组间的短接情况会导致匝数的减少。由于线圈的感应系数正比于匝数，故绕组的短路会导致电感感应系数的减小。但不能确定这是否会给电路带来不良影响。

17.9.5 故障检修中的其他问题

如前所述，有时工作电路的故障不完全是由故障元件所引起的。一个松动的线圈、一个虚焊点，或是焊点的焊锡很少，都有可能造成开路。而短路则可能是由剪掉的线头或溅落的焊锡引起的。一些看似简单的事情，诸如忘记插好电源插头，或是函数发生器偶然出现意想不到的

故障,电路中参数的错误(例如电阻值不正确),函数发生器的频率设置有误,或是电路的输出连接错误,都可能造成电路不能正常工作。

电路无法正常工作时,通常先确认各器件是否正确地接入电路,并正常供电;此外,应检查一些明显的错误,例如断开或松动的接点,连接器没有插好,某根电线或焊锡桥接电路导致短路等。

下面的例子说明了一个利用APM(分析、计划和测量)法及半分法检修包含电感和电阻的电路故障检修方法。

例17.15 图17.46所示的电路没有输出电压,即加在R_4两端的电压为0 V,且电路搭建在主板上。试用所学的故障检修方法找出存在的问题。

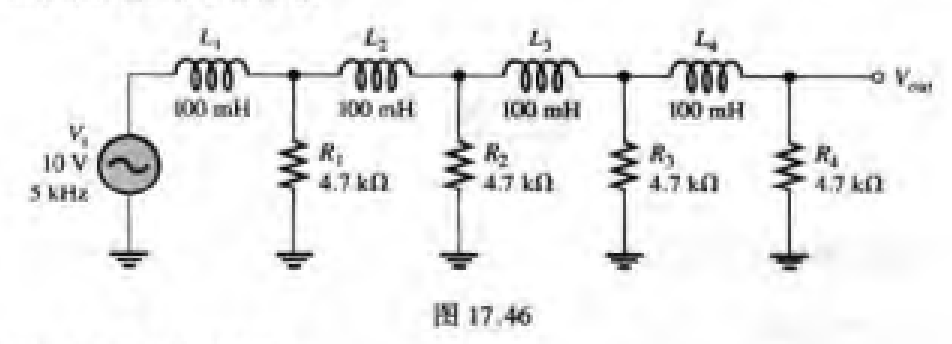


图17.46

解:应用APM法来解决这个问题。

分析:首先针对电路没有输出电压的问题,考虑可能存在的原因。

1. 没有输入电压,或由于输入电压频率过高,使电感电抗远远大于电阻阻抗而致使电感趋于开路。
2. 电阻和接地间短路。有可能是电阻短路,也有可能是电路中其他一些短路。电阻短路不是一种常见的故障。
3. 电源与输出端之间开路。在这种情况下,电流被阻断,从而使输出电压为零。可能是电感开路,也可能是由一个断开或松动的线圈,或主板触点损坏而造成的开路。
4. 元件的参数值错误。可能是由于电阻阻值过小,从而可以忽略加在其两端的电压。也有可能是由于电感过大,以至输入频率很高时导致电感感抗过大。

计划:首先,应该考虑做一些直观检查。例如,函数发生器的电源线没有接或者频率值设置不正确,电线断开或短接。除此之外,错误的电阻色标或电感值也经常出现。如果在直观检查后没有发现什么问题,则需要采用电压测量来追踪问题的原因。这里可以用一个数字示波器和万用表利用半分法来更快速地排除故障。

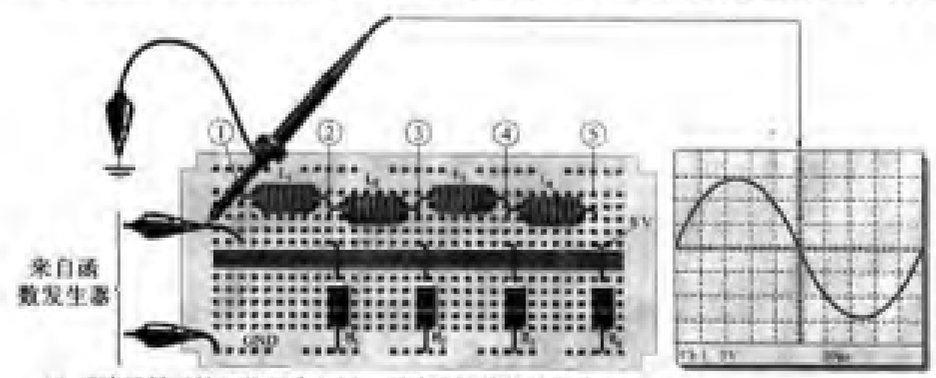
测量:假设经过检查确信,函数发生器已接入,而频率也正确设定,没有发现线路开路或短接的情况,元件参数也是正确的。

追踪测量的第一步,是用示波器检查函数发生器的输出电压。假设在电路的输入端已经观测到正弦波的有效值为10 V,频率为5 kHz,如图17.47(a)所示。由此可见,电路的输入电压是存在的。所以,第一种可能的原因被排除了。

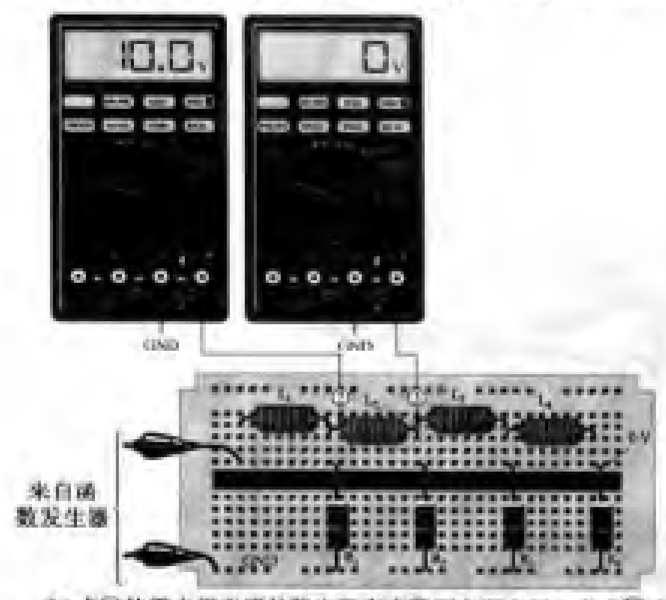
第二步,断开电源,将万用表(置为欧姆档)加在每个电阻的两端,检查是否有短路。如果有电阻短路,万用表的示数为零或显示极小的阻值。如果万用表的读数正确,则第二种可能的原因也被排除。

既然电压"降"在电路从输入端到输出端的某个地方,所以必然能够找到这个电压。重新接入信号源,利用半分法测量点③(电路中央)相对于接地点的电压。如图17.47(b)所示,万用表的测试端置于电感L_2的右端。若这一点的电压为零,说明电路中点③右面的部分可能没有问题,故障出现在电源到点③之间的电路中。

现在，从输出端向着电源方向来检测电压(当然，也可以从电源向输出端追踪)。如图 17.47(b)所示，将万用表测试端置于点②处，及位于电感 L_2 的左端，其读数为 10 V。由此说明 L_2 是开路的。幸运的是，只是元件而非电路板的触点出现故障，而通常来说重置元件比修补坏的触点要容易得多。



(a) 示波器显示输入的正确电压。示波器探针接地导线未显示



(b) 点③的零电压表明故障出现在点③到电源之间。在点②读到10 V电压表明L_2开路

图 17.47　例 17.15 的测量步骤

练习：假设利用万用表测量电感 L_2 左端的电压，读数为 0 V，而测量 L_1 右端的电压，读数为 10 V，这说明了什么问题？

17.9 节练习

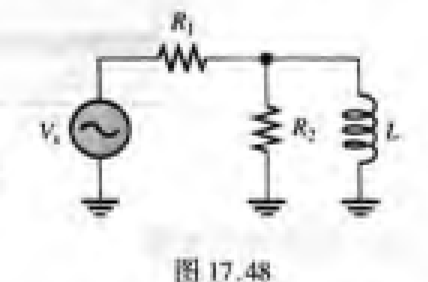


图 17.48

1. 试描述绕组短路的电感对串联 *RL* 电路的影响。
2. 试说明图 17.48 所示的电路中，电感 *L* 开路对 I_{tot}，V_{R1} 和 V_{R2}的影响。

技术实践

已知两个密封的模块从通信系统中移除。每个模块有三个终端，并且标注着 *RL* 滤波字样，但没有详细的说明书。现要求通过测试这个模块来确定该滤波器的类型以及各元件的参数值。

如图 17.49 所示，密封模块有三个终端分别标记为 IN，GND 和 OUT。应用所学的有关 *RL* 串联电路的知识以及一些基本的测量来确定电路内部结构以及元件的参数值。



图 17.49 模块 1 的欧姆表测量

模块 1 的欧姆表测量

■ 模块 1 的绕组电阻读数如图 17.49 中的万用表所示，试确定两个元件的排列以及电阻阻值。

模块 1 的交流测量

■ 通过图 17.50 中的测试设置确定电感的参数值。

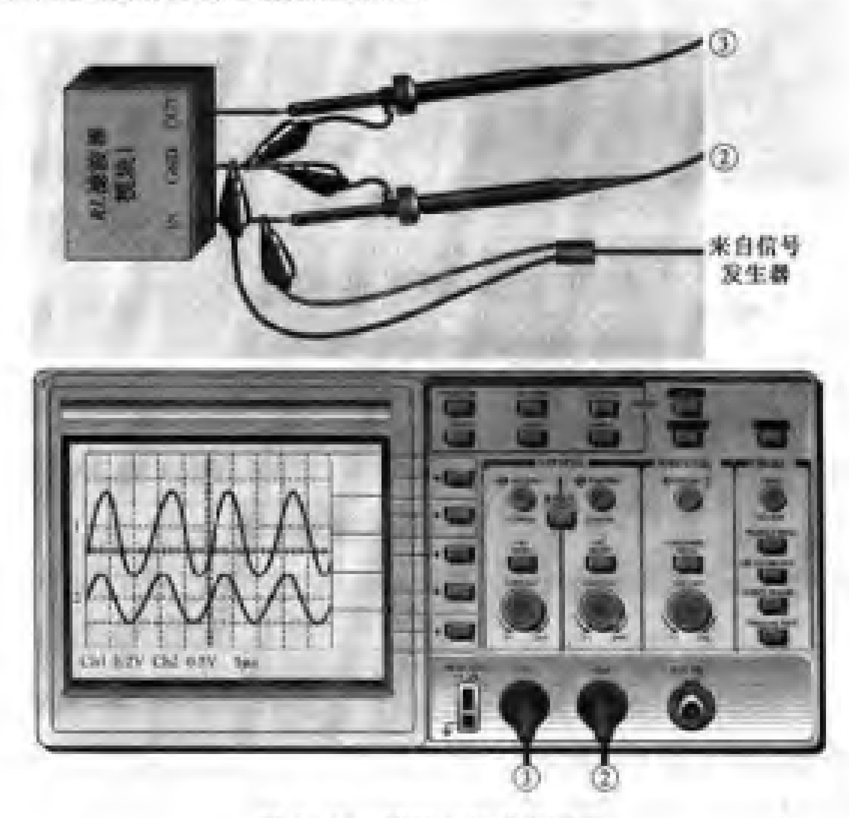


图 17.50 模块 1 的交流测量

模块 2 的欧姆表测量

■ 模块 2 的绕组电阻读数如图 17.51 中的万用表所示，试确定两个元件的排列以及电阻阻值。

模块 2 的交流测量

通过图 17.52 中的测试设置确定电感的参数值。



图 17.51 模块 2 的欧姆表测量

技术实践练习

1. 如果模块 1 中的电感开路，图 17.50 中的测试设备所测量的输出值应该是多少？
2. 如果模块 2 中的电感开路，图 17.52 中的测试设备所测量的输出值应该是多少？

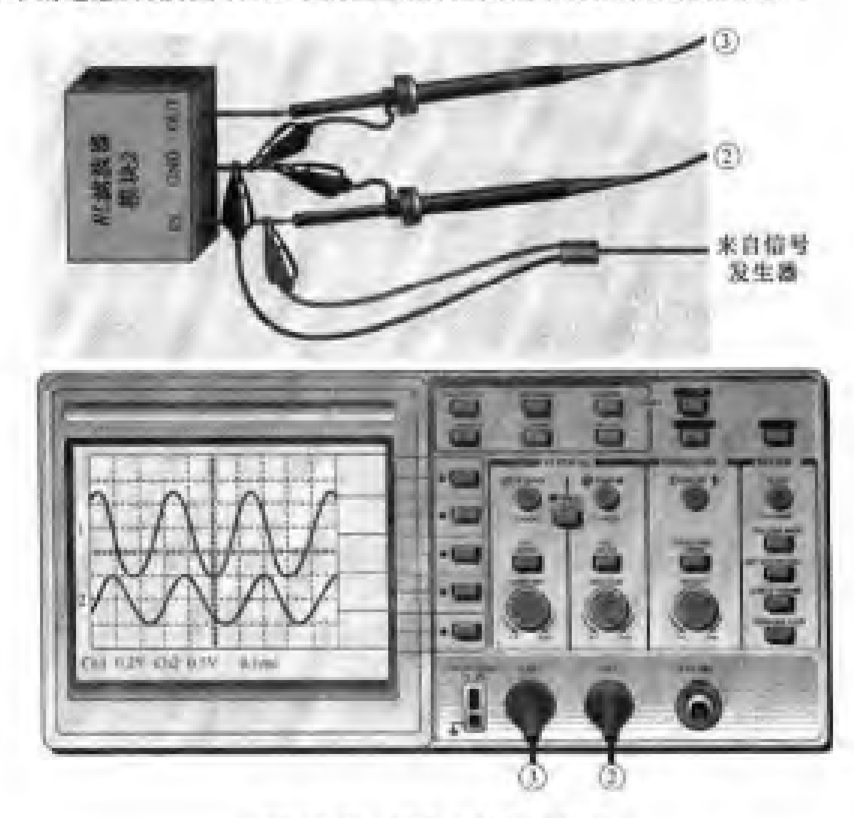


图 17.52 模块 2 的交流测量

小结

- RL 电路的输入为正弦电压时，电路中的电流和所有的电压降也是正弦波。
- 串联或并联 RL 电路中的总电流总是滞后于电源电压。
- 电阻上的电压与通过的电流相位相同。
- 一个理想的电感，其电压总是超前电流 90°。
- 在 RL 电路中，电路总阻抗由电阻阻抗和电感电抗共同决定。
- 阻抗的单位是欧姆。
- RL 电路的阻抗与其频率成正比。

- 串联 RL 电路的相移(θ)随频率正向变化。
- 电路的阻抗可以通过测量输入电压和总电流,再用欧姆定律计算来确定。
- RL 电路中,功率包括电阻功率和电抗功率。
- 功率因数表示视在功率中有功功率所占的比例。
- 功率因数为 1 说明电路是纯电阻电路,而功率因数为 0 则说明电路为纯电抗电路。
- 在一个滞后网络中,输出电压的相位滞后于输入电压的相位。
- 在一个超前网络中,输出电压的相位超前于输入电压的相位。
- 滤波器允许某些频率成分通过,而阻止其他频率成分通过。

主要术语

感抗:电感阻碍正弦电流的能力,单位为欧姆。

电感电纳(B_L):感抗的倒数,单位是西门子(S)。

公式

串联 RL 电路

17.1 $\mathbf{X}_l = jX_L$

17.2 $\mathbf{Z} = R + jX_L$

17.3 $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$

17.4 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$

17.5 $\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$

17.6 $\mathbf{V}_s = V_R + jV_L$

17.7 $\mathbf{V}_s = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{V_L}{V_R}\right)$

17.8 $V_s = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$

17.9 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_L}{V_R}\right)$

并联 RL 电路

17.10 $\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)\angle\left(90° - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)\right)$

17.11 $Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$

17.12 $\phi = 90° - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$

17.13 $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right)$

17.14 $\mathbf{B}_L = \frac{1}{X_L\angle 90°} = B_L\angle -90° = -jB_L$

17.15 $\mathbf{Y} = \frac{1}{Z\angle \pm\theta} = Y\angle \pm\mp\theta$

17.16 $\mathbf{Y} = G - jB_L$

17.17 $\mathbf{I}_{tot} = I_R - jI_L$

17.18 $I_{tot} = \sqrt{I_R^2 - I_L^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{I_L}{I_R}\right)$

17.19 $I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$

17.20 $\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{I_L}{I_R}\right)$

RL 电路的功率

17.21 $P_r = I^2 X_L$

超前网络

17.22 $\phi = 90° - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$

17.23 $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right)$

17.24 $V_{out} = \left(\frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in}$

17.25 $V_{out} = IX_L$

17.26 $\mathbf{V}_{out} = V_{out}\angle\phi$

滞后网络

17.27 $\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$

17.28 $V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in}$

17.29 $V_{out} = IR$

17.30 $\mathbf{V}_{out} = V_{out}\angle -\phi$

自测题

1. 在串联 RL 电路中,电阻电压将:
   (a) 超前电源电压　(b) 滞后电源电压
   (c) 与电源电压同相　(d) 与电流同相
   (e) 答案(a)和(d)　(f) 答案(b)和(d)
2. 串联 RL 电路中电源电压的频率增加,则阻抗将:
   (a) 下降　(b) 上升　(c) 不变
3. 串联 RL 电路中电源电压频率下降,则阻抗将:
   (a) 下降　(b) 上升　(c) 不变
4. 如果频率加倍且电阻阻抗减半,则串联 RL 电路的阻抗将:
   (a) 增加一倍　(b) 减半　(c) 保持不变　(d) 没有参数值无法确定
5. 若使串联 RL 电路中的电流下降,频率应该:
   (a) 上升　(b) 下降　(c) 不变
6. 串联 RL 电路,加在电阻两端的电压有效值为 10 V,加在电感两端的电压有效值为 10 V,则电源电压的峰值为:
   (a) 14.14 V　(b) 28.28 V　(c) 10 V　(d) 20 V
7. 第 6 题中的电压是在一定频率下测量的。若使电阻电压大于电感电压,则频率应该:
   (a) 上升　(b) 下降　(c) 加倍　(d) 不是影响因素

8. 串联 RL 电路中的电阻电压逐渐变得大于电感电压时,相角将:
   (a) 变大 (b) 变小 (c) 不变
9. 电源电压的频率上升时,并联 RL 电路的总阻抗将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 保持不变
10. 在并联 RL 电路中,通过电阻支路的电流有效值为 2 A,通过电感支路的电流有效值也为 2 A,则总电流的有效值为:
    (a) 4 A (b) 5.656 A (c) 2 A (d) 2.828 A
11. 观察一个模拟示波器上显示的两个电压波形,通过调节示波器的时基(时间/刻度)使波形的二分之一周期正好覆盖水平 10 个刻度。这时,当一个波形的正向零交点位于最左侧的刻度时,向右移动三个刻度为另一个波形的正向零交点。则这两个电压间的相位差为:
    (a) 18° (b) 36° (c) 54° (d) 180°
12. 某 RL 电路中,试确定当功率因数为下列哪个值时,转换为热能的能量较少。
    (a) 1 (b) 0.9 (c) 0.5 (d) 0.1
13. 如果负载为纯电感,且电抗功率为 10 VAR,则视在功率为:
    (a) 0 VA (b) 10 VA (c) 14.14 VA (d) 3.16 VA
14. 对于一个确定的负载,有功功率为 10 W,且电抗功率也是 10 VAR,则视在功率为:
    (a) 5 VA (b) 20 VA (c) 14.14 VA (d) 100 VA

故障检修测验

参见图 17.55

1. 如果 L 开路,则加在其上的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变
2. 如果 R 开路,则加在 L 两端的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变
3. 如果频率上升,则加在 R 两端的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变

参见图 17.60

4. 如果 L 开路,则加在 R 两端的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变
5. 如果 f 上升,则通过 R 的电流将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变

参见图 17.66

6. 如果 R_1 变为开路,则通过 L_1 的电流将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变
7. 如果 L_2 开路,则加在 R_2 两端的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变

参见图 17.67

8. 如果 L_2 开路,则 B 点到地的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变
9. 如果 L_1 开路,则 B 点到地的电压将:
   (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变
10. 如果电源电压的频率上升,则通过 R_1 的电流将:
    (a) 上升 (b) 下降 (c) 不变

11．如果电源电压的频率下降，则点 A 到地的电压将：

(a) 上升　(b) 下降　(c) 不变

参见图 17.72

12．如果 L_2 开路，则加在 L_1 两端的电压将：

(a) 上升　(b) 下降　(c) 不变

13．如果 R_1 开路，则输出电压将：

(a) 上升　(b) 下降　(c) 不变

14．如果 R_3 变为开路，则输出电压将：

(a) 上升　(b) 下降　(c) 不变

15．如果 L_2 发生局部短路，则电源电流将：

(a) 上升　(b) 下降　(c) 不变

16．如果电源频率上升，则输出电压将：

(a) 上升　(b) 下降　(c) 不变

习题（带 * 的习题难度较大，奇数序号的题目答案在本书末尾）

第一部分：串联电抗电路

17.1 节　RL 电路的正弦响应

1．将一个频率为 15 kHz 的正弦电压加在某串联 RL 电路中，求 I、V_R 和 V_L 的频率分别为多少？

2．习题 1 中的 I、V_R 和 V_L 的波形形状是什么样子？

17.2 节　串联 RL 电路的阻抗和相角

3．分别用极坐标和直角坐标形式描述图 17.53 中各电路的总阻抗。

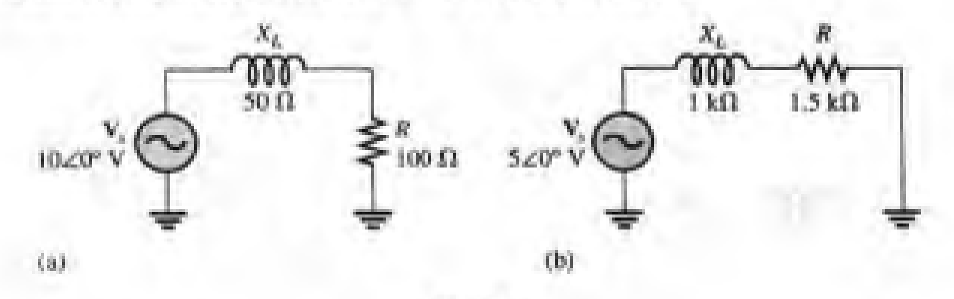


图 17.53

4．试确定图 17.54 中各电路的阻抗大小及相角，并画出阻抗图。

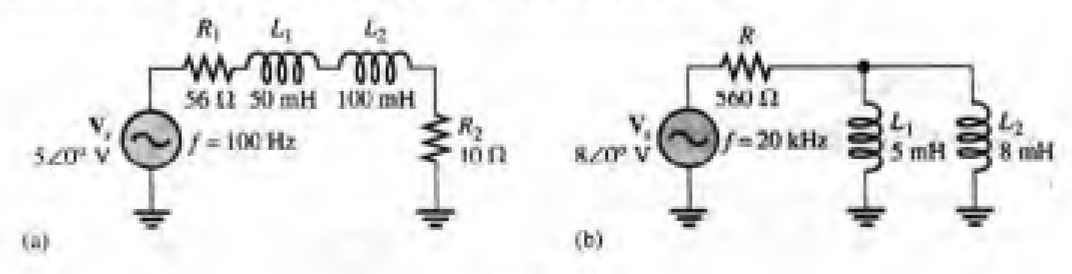


图 17.54

5．图 17.55 中，试确定下列频率时该电路的阻抗。

(a) 100 Hz　(b) 500 Hz　(c) 1 kHz　(d) 2 kHz

6. 串联 RL 电路中的电路总阻抗为下列各值时，试确定 R 和 X_L 的值。

(a) $\mathbf{Z} = 20\ \Omega + j45\ \Omega$　　(b) $\mathbf{Z} = 500\angle 35°\ \Omega$

(c) $\mathbf{Z} = 2.5\angle 72.5°\ \text{k}\Omega$　　(d) $\mathbf{Z} = 998\angle 45°\ \Omega$

7. 将图 17.56 中的电路简化为单个电阻与电感的串联。

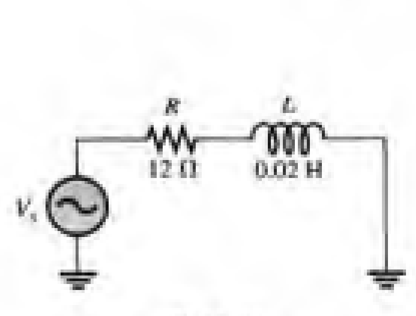


图 17.55

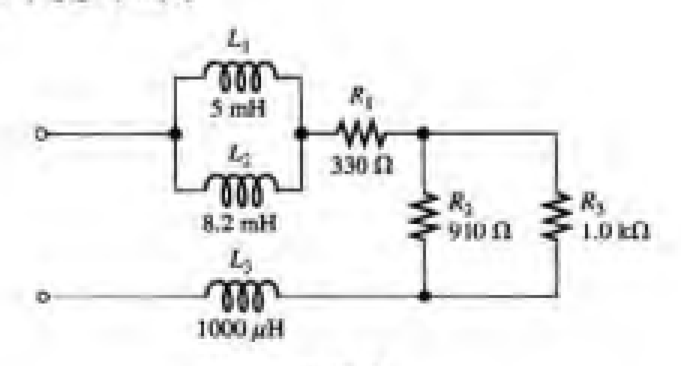


图 17.56

17.3 节　串联 RL 电路的分析

8. 用极坐标形式表示图 17.53 中各电路的电流。
9. 试计算图 17.54 中各电路的总电流并用极坐标表示。
10. 试确定图 17.57 中电路的 θ 值。
11. 如果图 17.57 中的感应系数加倍，则 θ 值是上升还是下降，且变化了多少度？
12. 画出图 17.57 中 V_s、V_R 和 V_L 的波形，并标明相位关系。
13. 图 17.58 所示的电路中，计算下列频率下的 V_R 和 V_L 的数值。

(a) 60 Hz　(b) 200 Hz　(c) 500 Hz　(d) 1 kHz

14. 试确定图 17.59 中电源电压的大小及相角。

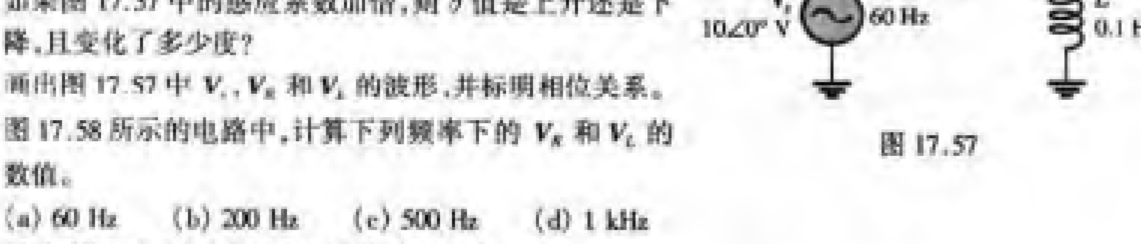


图 17.57

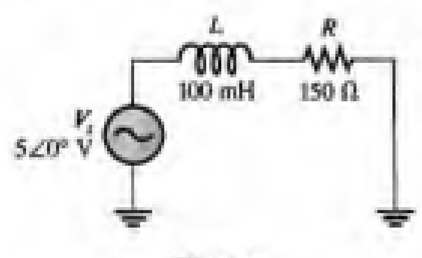


图 17.58

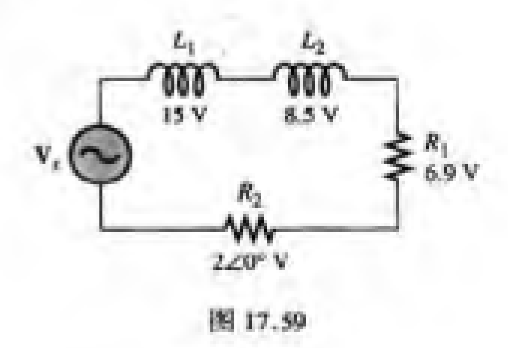


图 17.59

第二部分：并联电抗电路

17.4 节　并联电抗电路的阻抗和相角

15. 试用极坐标形式表示图 17.60 中的电路阻抗。
16. 在下列频率下重复完成习题 15：

(a) 1.5 kHz　(b) 3 kHz

(c) 5 kHz　(d) 10 kHz

17. 图 17.60 中，什么频率下 X_L 等于 R。

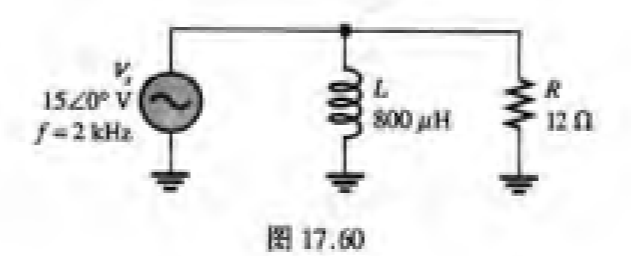


图 17.60

17.5 节 并联 RL 电路的分析

18. 计算图 17.61 中的总电路及各支路电流。
19. 试确定图 17.62 中下列各变量的值：
    (a) $\boldsymbol{Z}$ (b) $\boldsymbol{I}_R$ (c) $\boldsymbol{I}_L$ (d) $\boldsymbol{I}_{tot}$ (e) θ

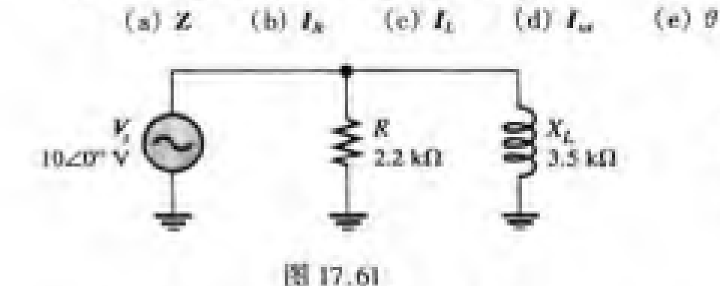


图 17.61

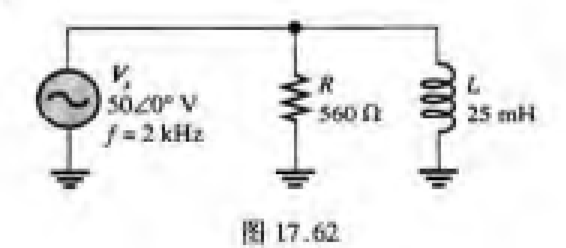


图 17.62

20. $R = 56\ \Omega$ 且 $L = 330\ \mu\text{H}$ 时，重复完成习题 19。
21. 将图 17.63 中的电路转换为串联等效形式。
22. 计算图 17.64 中总电流的大小和相角。

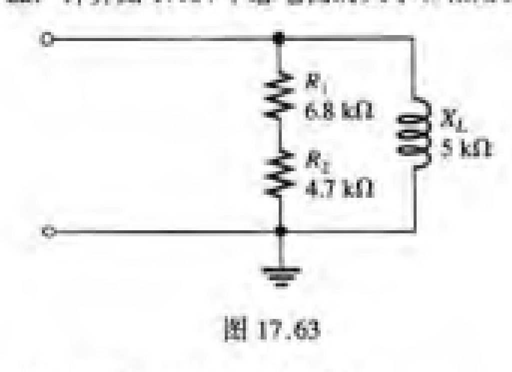


图 17.63

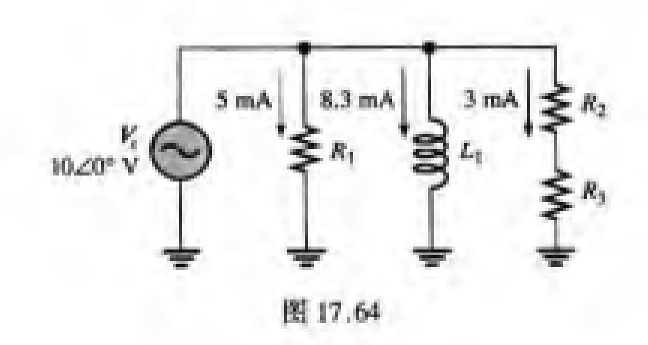


图 17.64

第三部分：串－并联电抗电路

17.6 节 串－并联 RL 电路的分析

23. 图 17.65 所示的电路中，用极坐标形式表示各元件上的电压，并画出电压相量图。
24. 图 17.65 所示的电路中，整个电路是呈阻性还是感性？

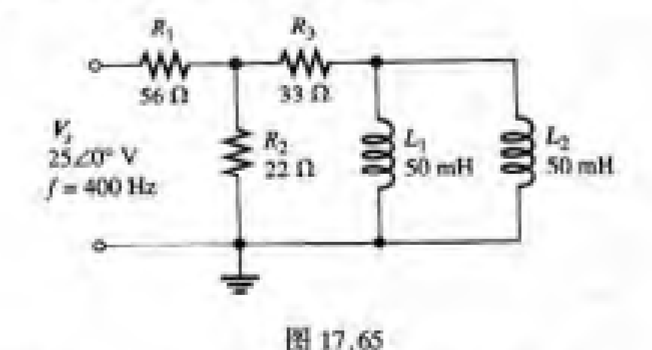


图 17.65

25. 计算图 17.65 中的总电流及各支路电流，并用极坐标形式表示。请画出电流相量图。
26. 图 17.66 所示的电路中，试确定下列变量的值：
    (a) $\boldsymbol{I}_{tot}$ (b) θ (c) $\boldsymbol{V}_{R1}$ (d) $\boldsymbol{V}_{R2}$ (e) $\boldsymbol{V}_{R3}$ (f) $\boldsymbol{V}_{L1}$ (g) $\boldsymbol{V}_{L2}$

*27. 图 17.67 所示的电路中，试确定下列各变量的值：
    (a) $\boldsymbol{I}_{tot}$ (b) $\boldsymbol{V}_{L1}$ (c) $\boldsymbol{V}_{AB}$

*28. 画出图 17.67 中所有电压和电流的相量图。

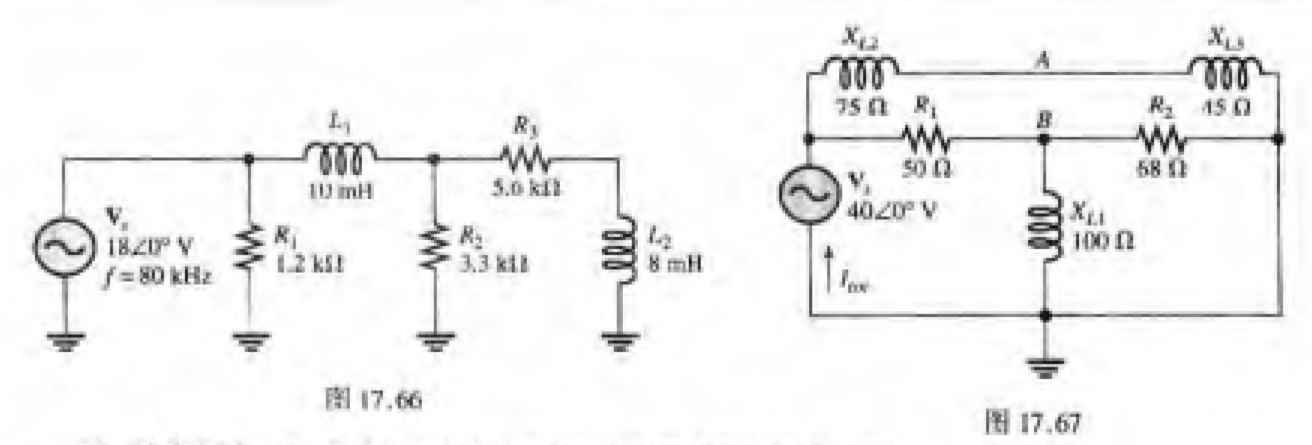


图 17.66

图 17.67

29. 试确定图 17.68 所示电路中输入到输出的相移以及衰减(V_{out}/V_{in})。

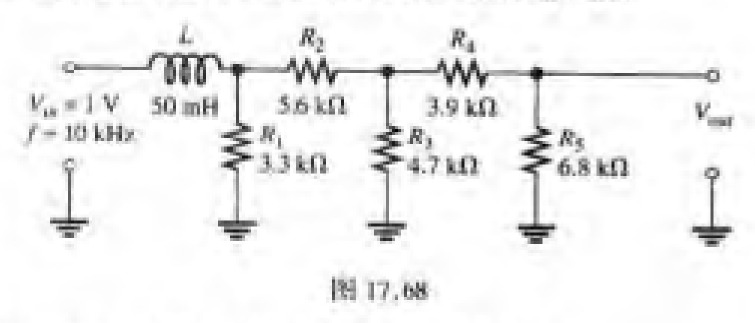


图 17.68

*30. 图 17.69 所示的电路中,试确定从输入到输出的相移及衰减。

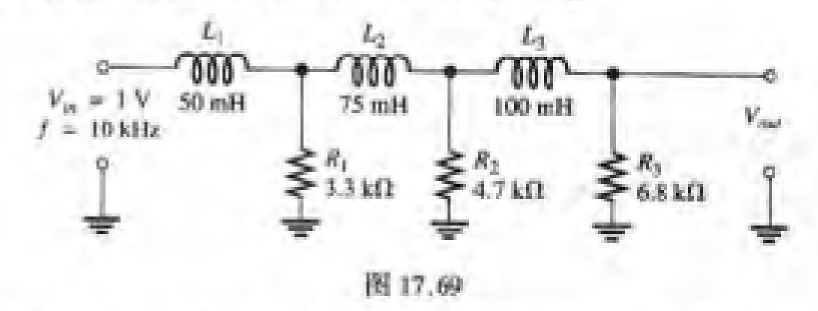


图 17.69

31. 试设计一个理想的感应开关电路,要求开关从一个位置打到另一个位置的瞬间,12 V 的直流电源可以提供 2.5 kV 的瞬时电压,且电源的耗用电流不能超过 1 A。

第四部分:专题讨论

17.7 节 *RL* 电路中的功率

32. 某个 *RL* 电路中,有功功率为 100 mW,无功功率为 340 mVAR,则视在功率为多少?
33. 试确定图 17.57 中的有功功率和无功功率。
34. 图 17.61 中的功率因数是多少?
35. 试确定图 17.66 所示电路中的 P_{true}、P_r、P_a 和 *PF* 的数值,并画出功率三角形。
*36. 试求图 17.67 电路中的有功功率。

17.8 节 基本应用

37. 图 17.70 所示的滞后网络中,试确定下列频率中输出电压滞后于输入电压的角度:
(a) 1 Hz (b) 100 Hz (c) 1 kHz (d) 10 kHz
38. 图 17.70 所示的电路中,试以 1 kHz 为增量画出 0 Hz - 5 kHz 的频率所对应的输出电压响应曲线。
39. 图 17.71 所示的超前网络中,试确定下列频率中输出电压超前于输入电压的角度。

40. 图 17.71 所示的电路中，试以 1 kHz 为增量画出 0 Hz ~ 5 kHz 的频率所对应的输出电压响应曲线。
41. 试画出频率为 8 kHz 时，图 17.70 和图 17.71 中各电路的电压相图。

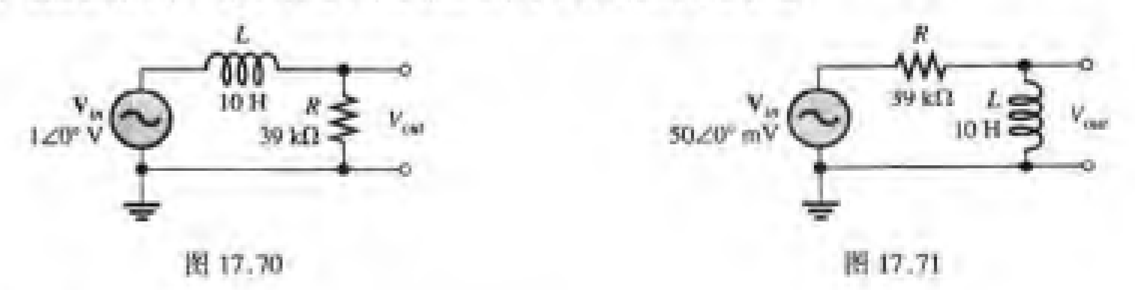


图 17.70　　图 17.71

17.9 节　故障检修

42. 图 17.66 中，若 L_1 开路，试确定各元件的电压值。
43. 图 17.72 中，试确定下列故障模式下输出电压的值：
    (a) L_1 开路　(b) L_2 开路　(c) R_1 开路　(d) R_2 被短路

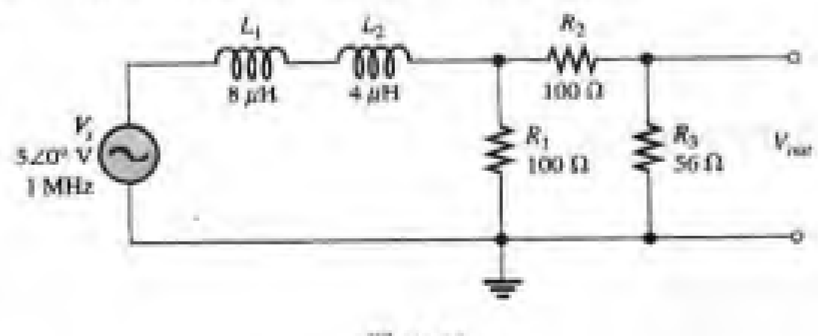


图 17.72

EWB/Multisim 故障检修

这些问题需查阅本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

44. 打开文件 P17.44，确定是否存在故障。若存在，请找出。
45. 打开文件 P17.45，确定是否存在故障。若存在，请找出。
46. 打开文件 P17.46，确定是否存在故障。若存在，请找出。
47. 打开文件 P17.47，确定是否存在故障。若存在，请找出。
48. 打开文件 P17.48，确定是否存在故障。若存在，请找出。
49. 打开文件 P17.49，确定是否存在故障。若存在，请找出。
50. 打开文件 P17.50，试确定滤波器的频率响应。
51. 打开文件 P17.51，试确定滤波器的频率响应。

答案

17.1 节　*RL* 电路的正弦响应

1. 电流频率为 1 kHz。
2. 相角接近 0°。

17.2 节　串联 *RL* 电路的阻抗和相角

1. $R = 150\ \Omega$; $X_L = 220\ \Omega$
2. $\mathbf{Z} = R + jX_L = 33\ \text{k}\Omega + j50\ \text{k}\Omega$; $\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}(X_L/R) = 59.9\angle 56.6°\ \text{k}\Omega$

17.3节 串联 RL 电路的分析

1. $V_s=\sqrt{V_R^2+V_L^2}=3.61\ \text{V}$
2. $\theta=\tan^{-1}(V_L/V_R)=56.3°$
3. 当 f 上升时,X_L 下降,Z 上升,θ 上升。

17.4节 并联电抗电路的阻抗和相角

1. $Y=\dfrac{1}{Z}=\dfrac{1}{\sqrt{R^2+X_L^2}}=2\ \text{mS}$
2. $Y=\dfrac{1}{Z}=25.1\ \text{mS}$
3. $\boldsymbol{I}$ 滞后 V_s;$\theta=32.1°$

17.5节 并联 RL 电路的分析

1. $I_{tot}=32\ \text{mA}$
2. $\boldsymbol{I}_{tot}=23.3\angle-59.0°\ \text{mA}$;$\theta$ 是相对于输入电压而言。
3. $\theta=-90°$

17.6节 串-并联 RL 电路的分析

1. $\boldsymbol{Z}=494\angle 59.0°\ \Omega$
2. $I_{tot}=10.4\ \text{mA}-j17.3\ \text{mA}$

17.7节 RL 电路中的功率

1. 功率主要是由电阻消耗的。
2. $PF=0.643$
3. $P_{true}=4.7\ \text{W}$;$P_r=6.2\ \text{VAR}$;$P_a=7.78\ \text{VA}$

17.8节 基本应用

1. $\phi=81.9°$
2. $V_{out}=9.90\ \text{V}$
3. 输出取自电阻两端。

17.9节 故障检修

1. 任意频率下,绕组短路使 X_L 减少。
2. I_{tot}下降,V_{R1}下降,V_{R2}上升。

技术实践

1. $V_{out}=0\ \text{V}$
2. $V_{out}=V_{in}$

实例相关练习

17.1 $\boldsymbol{Z}=1.8\ \text{k}\Omega+j950\ \Omega$;$\boldsymbol{Z}=2.04\angle 27.8°\ \text{k}\Omega$

17.2 $\boldsymbol{I}=423\angle-32.1°\ \mu\text{A}$

17.3 $Z=12.6\ \text{k}\Omega$;$\theta=85.5°$

17.4 $\boldsymbol{Z}=8.14\angle 35.5°\ \text{k}\Omega$

17.5 $\boldsymbol{Y}=3.03\ \text{mS}-j0.796\ \text{mS}$

17.6 $I = 14.0\angle -71.1^\circ$ mA

17.7 $I_{tot} = 67.6$ mA; $\theta = 36.3^\circ$

17.8 (a) $V_1 = 8.04\angle 2.52^\circ$ V

(b) $V_2 = 2.00\angle -10.2^\circ$ V

17.9 $I_{tot} = 20.2\angle -59.0^\circ$ mA

17.10 P_{true}, P_r 和 P_a 下降。

17.11 $\theta = 65.6^\circ$

17.12 V_{out} 上升。

17.13 $\phi = -32^\circ$

17.14 $V_{out} = 12.3$ V rms

17.15 L_1 与 L_2 间开路

自测题

1.(f) 2.(b) 3.(a) 4.(d) 5.(a) 6.(d) 7.(b) 8.(b)
9.(a) 10.(d) 11.(c) 12.(d) 13.(b) 14.(c)

故障检修测验

1.(a) 2.(b) 3.(b) 4.(c) 5.(c) 6.(c) 7.(a) 8.(c)
9.(a) 10.(b) 11.(c) 12.(b) 13.(a) 14.(a) 15.(a) 16.(b)

第18章　*RLC* 电路和谐振

引言

在本章中，我们用第16章和第17章中介绍的分析方法来分析电阻、电感以及电容元件的组合电路。本章将探讨 *RLC* 串联、并联以及串并联混合电路。

电容和电感组成的电路有谐振特性，这一点在许多应用中非常重要。在通信系统中的频率选择电路中，谐振是基础。例如，收音机和电视机的接收模块要接收某个台发送的特定频率信号，同时消除其他台发送的信号，就是建立在谐振的基础上。*RLC* 电路产生谐振的条件以及谐振电路的特性都是本章的内容。

知识点及其学习方法选择

如果选择选项一，即学习第16章和第17章的全部内容，那么接下来应学习本章全部内容。

如果选择选项二，即在四大元件的基础上学习了第16章和第17章中的阻抗性电路，那么下面应学习本章的适当内容，再接下来学习第16章的剩余部分。

本章目标

第一部分：串联阻抗电路

- *RLC* 串联电路阻抗的求解
- *RLC* 串联电路的分析
- 串联谐振电路的分析

第二部分：并联阻抗电路

- *RLC* 并联电路阻抗的求解
- *RLC* 并联电路的分析
- 并联谐振电路的分析

第三部分：串并联阻抗电路

- *RLC* 串并联电路的分析

第四部分：专题讨论

- 确定谐振电路的带宽
- 讨论谐振电路的一些应用

主要术语

- 串联谐振
- 谐振频率(f_r)
- 并联谐振
- 振荡电路
- 半功率点频率
- 选频电路

技术实践

在技术实践中，将利用电路谐振性对一台调幅收音机中的 RF 放大器进行校准。校准电路用来在调幅收音机带宽内选择任何理想频率，使得所需的电台能够调准。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

第一部分：串联阻抗电路

18.1　串联 *RLC* 电路的阻抗

串联 *RLC* 电路由电阻、电容和电感组成。由于感性阻抗和容性阻抗对电路相位角的作用相反，所以总的电抗小于任何一个单独的电抗。

学完本节后，读者应该能够：

- 掌握 *RLC* 电路阻抗的求法
- 计算电路总阻抗
- 确定电路是感性的还是容性的

串联 *RLC* 电路如图 18.1 所示，由电阻、电感和电容组成。

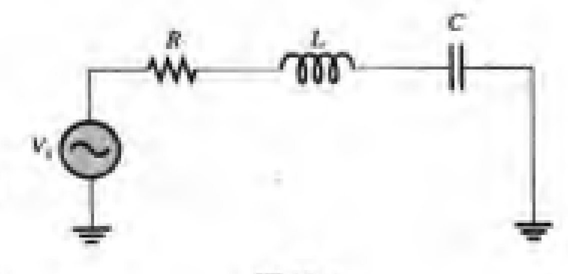


图 18.1

从前面的章节已知，感性电抗 X_L 使电路总电流滞后于电源电压，容性电抗 X_C 则有相反的效果：使电流超前于电源电压。所以，X_C 和 X_L 往往相互抵消。当它们相等时，总的电抗为零。在任何情况下，串联电路中总电抗的幅值为：

$$X_{tot} = |X_L - X_C| \tag{18.1}$$

$|X_L - X_C|$ 表示两个阻抗之差的绝对值。也就是说，不管哪个阻抗大，其结果都为正。比如 $3-7=-4$，但绝对值为：

$$|3-7| = 4$$

当 $X_L > X_C$ 时，电路是感性的；当 $X_C > X_L$ 时，电路是容性的。

RLC 电路总阻抗的直角坐标表示参见式(18.2)，极坐标表示参见式(18.3)。

$$\mathbf{Z} = R + jX_L - jX_C \tag{18.2}$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right) \tag{18.3}$$

在式(18.3)中，$\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ 是幅度，$\tan^{-1}(X_{tot}/R)$ 是电流和电源电压之间的相位差。

例 18.1　求图 18.2 所示电路的总阻抗，分别以直角坐标和极坐标形式表示。

解：首先确定 X_C 和 X_L。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(100\text{ kHz})(470\text{ pF})} = 3.39\text{ k}\Omega$$
$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(100\text{ kHz})(10\text{ mH}) = 6.28\text{ k}\Omega$$

本例中，X_L 大于 X_C，因而电路感性作用大于容性作用。总电抗大小为：

$$X_{tot}=|X_L-X_C|=|6.28\ \text{k}\Omega-3.39\ \text{k}\Omega|=2.89\ \text{k}\Omega \quad \text{电感性}$$

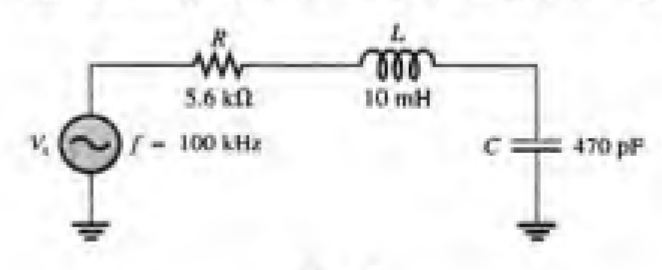


图 18.2

阻抗按直角坐标形式表示为：

$$\mathbf{Z}=R+(jX_L-jX_C)=5.6\ \text{k}\Omega+(j6.28\ \text{k}\Omega-j3.39\ \text{k}\Omega)=\mathbf{5.6\ k\Omega+\mathit{j}2.89\ k\Omega}$$

阻抗按极坐标形式表示为：

$$\mathbf{Z}=\sqrt{R^2+X_{tot}^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$$

$$=\sqrt{(5.6\ \text{k}\Omega)^2+(2.89\ \text{k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{2.89\ \text{k}\Omega}{5.6\ \text{k}\Omega}\right)=\mathbf{6.30\angle27.3^\circ\ k\Omega}$$

练习：频率增至 200 kHz 时，按极坐标形式求 Z。

从上面的例子可以看出：当感性电抗大于容性电抗时，电路表现为电感性，所以电流滞后于电源电压。当容性电抗大时，电路表现为电容性，电流就超前于电源电压。

18.1 节练习

1. 在一给定 *RLC* 串联电路中，$X_C=150\ \Omega$，$X_L=80\ \Omega$，总电抗是多少？是电容性的还是电感性的？
2. $R=47\ \Omega$ 时，按极坐标形式求第 1 题的阻抗，阻抗大小是多少？相角是多少？电流是超前还是滞后于电源电压？

18.2 串联 *RLC* 电路的分析

回忆一下，容性电抗与频率成反比，感性电抗和频率成正比。在本节中，将分析电抗的综合效果，它是频率的函数。

学完本节后，读者应该能够：

- 分析串联 *RLC* 电路
- 求串联 *RLC* 电路的电流
- 求串联 *RLC* 电路的各电压
- 求相角

图 18.3 是典型 *RLC* 电路中总电抗的变化规律：从非常低的频率开始，X_C 较高，X_L 较低，电路是电容性的。随着频率的升高，X_C 减小，X_L 增大，当 $X_C=X_L$ 时，两者的电抗效应相互抵消，电路是纯电阻电路。这就是串联谐振的条件，将在 18.3 节中介绍。频率进一步增大，X_L 大于 X_C，电路就是电感性的。例 18.2 说明了阻抗和阻抗角如何随着频率的变化而变化。

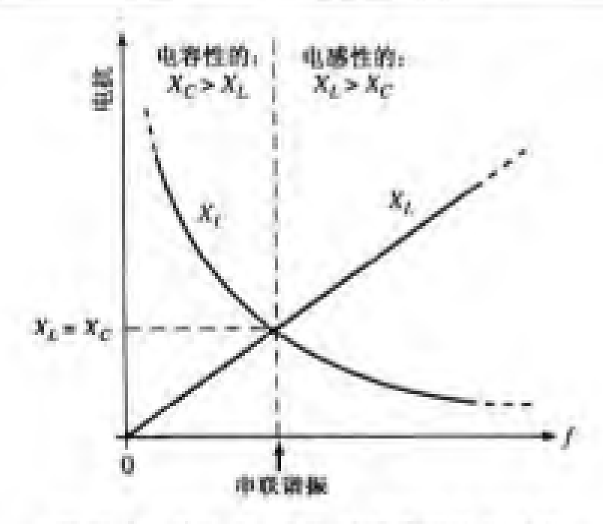


图 18.3　表示 X_C 和 X_L 随频率变换的曲线

在图 18.3 中，X_L 的变化是直线，X_C 的变化是曲线。直线的通用方程是 $y = mx + b$，其中 m 是直线的斜率，b 是在 y 轴上的交叉点。公式 $X_L = 2\pi fL$ 符合这个方程，其中 $y = X_L$（变量），$m = 2\pi L$（常量），$x = f$（变量），$b = 0$，即 $X_L = 2\pi Lf + 0$。

X_C 的变化是双曲线，其通用方程为 $xy = k$。容性电抗方程为 $X_C = 1/2\pi fC$，通过变换，可以得到下面的式子：$X_C f = 1/2\pi C$，其中 $x = X_C$（变量），$y = f$（变量），$k = 1/2\pi C$（常量）。

例 18.2　对于下面电源的频率，确定图 18.4 所示电路阻抗的极坐标形式。注意阻抗大小和相位角随频率如何变化。

(a) $f = 1$ kHz　　(b) $f = 2$ kHz

(c) $f = 3.5$ kHz　　(d) $f = 5$ kHz

图 18.4

解：(a) 当 $f = 1$ kHz 时，

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1\ \text{kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 7.23\ \text{k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1\ \text{kHz})(100\ \text{mH}) = 628\ \Omega$$

电路明显是容性的，其阻抗为：

$$\boldsymbol{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(3.3\ \text{k}\Omega)^2 + (628\ \Omega - 7.23\ \text{k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{6.60\ \text{k}\Omega}{3.3\ \text{k}\Omega}\right) = \mathbf{7.38\angle -63.4^\circ\ k\Omega}$$

(b) 当 $f = 2$ kHz 时，

$$X_C = \frac{1}{2\pi(2\ \text{kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 3.62\ \text{k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi(2\ \text{kHz})(100\ \text{mH}) = 1.26\ \text{k}\Omega$$

电路仍是容性的，其阻抗为：

$$\boldsymbol{Z} = \sqrt{(3.3\ \text{k}\Omega)^2 + (1.26\ \text{k}\Omega - 3.62\ \text{k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{2.36\ \text{k}\Omega}{3.3\ \text{k}\Omega}\right)$$

$$= \mathbf{4.06\angle -35.6^\circ\ k\Omega}$$

(c) 当 $f=3.5\ \text{kHz}$ 时，

$$X_C=\frac{1}{2\pi(3.5\ \text{kHz})(0.022\ \mu\text{F})}=2.07\ \text{k}\Omega$$
$$X_L=2\pi(3.5\ \text{kHz})(100\ \text{mH})=2.20\ \text{k}\Omega$$

因为 X_C 和 X_L 近似相等，所以电路很接近纯电阻性，但仍是电容性的。其阻抗为：

$$\mathbf{Z}=\sqrt{(3.3\ \text{k}\Omega)^2+(2.20\ \text{k}\Omega-2.07\ \text{k}\Omega)^2}\angle-\tan^{-1}\left(\frac{0.13\ \text{k}\Omega}{3.3\ \text{k}\Omega}\right)$$
$$=\mathbf{3.3\angle-2.26^\circ\ k\Omega}$$

(d) 当 $f=5\ \text{kHz}$ 时，

$$X_C=\frac{1}{2\pi(5\ \text{kHz})(0.022\ \mu\text{F})}=1.45\ \text{k}\Omega$$
$$X_L=2\pi(5\ \text{kHz})(100\ \text{mH})=3.14\ \text{k}\Omega$$

此时电路主要是电感性，其阻抗为：

$$\mathbf{Z}=\sqrt{(3.3\ \text{k}\Omega)^2+(3.14\ \text{k}\Omega-1.45\ \text{k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.69\ \text{k}\Omega}{3.3\ \text{k}\Omega}\right)$$
$$=\mathbf{3.71\angle27.1^\circ\ k\Omega}$$

注意：随着频率的增加，电路如何由电容性变成电感性。如用阻抗角符号所示，随着电流由超前变为滞后，阻抗角的情况发生了变化。请注意阻抗的大小降到最低(即近似等于电阻值)时又开始增加。

练习：利用本题的参数，求出 $f=7\ \text{kHz}$ 时阻抗 $\mathbf{Z}$ 的极坐标形式，并画出阻抗随频率变化的曲线。

在串联 RLC 电路中，电容和电感上的电压在相位上总是相差 180°，因此 V_C 和 V_L 就会相减，并且电感 L 和电容 C 组合部分的电压小于二者中较大的那个电压，如图 18.5 所示，图 18.6 是波形图。

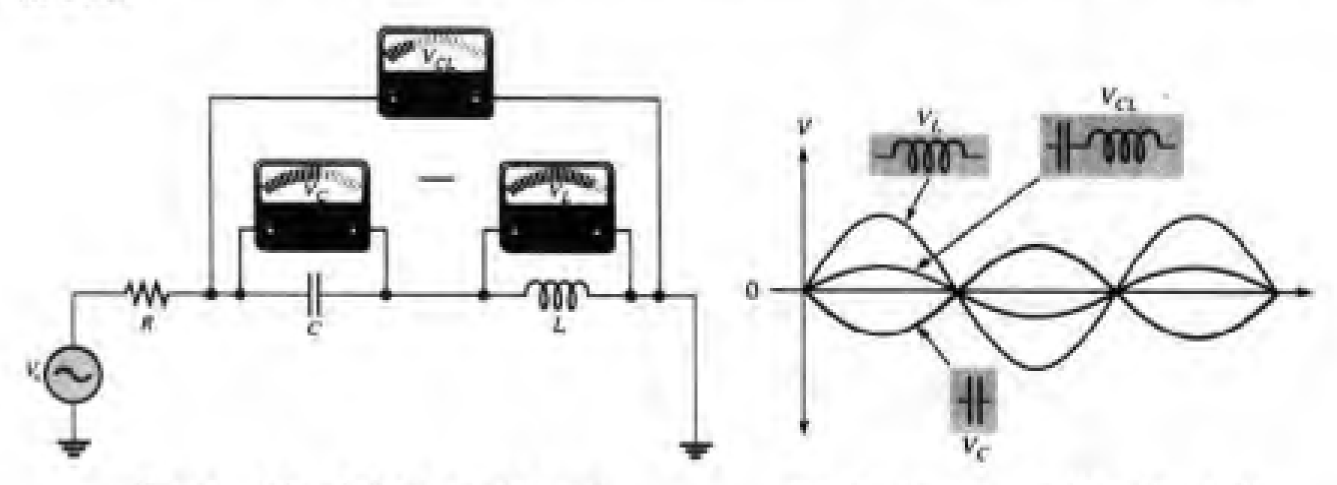


图 18.5 C 和 L 串联电路两端的电压总是小于两者中较大的那个电压

图 18.6 V_{CL} 是 V_L 和 V_C 的代数和，由于相位的关系，V_L 和 V_C 实际上相减

在下面的例子中，用欧姆定律来串联 RLC 电路上的电流和电压。

例 18.3 求图 18.7 中每个元件的电压和电流。每个量用极坐标形式表示，并画出完整的电压相量图。

解： 第一步，求出总阻抗：

$$\mathbf{Z}=R+jX_L-jX_C=75\ \Omega+j25\ \Omega-j60\ \Omega=75\ \Omega-j35\ \Omega$$

将阻抗变成极坐标形式：

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$$
$$= \sqrt{(75\ \Omega)^2 + (35\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{35\ \Omega}{75\ \Omega}\right) = 82.8\angle -25°\ \Omega$$

式中 $X_{tot} = |X_L - X_C|$。

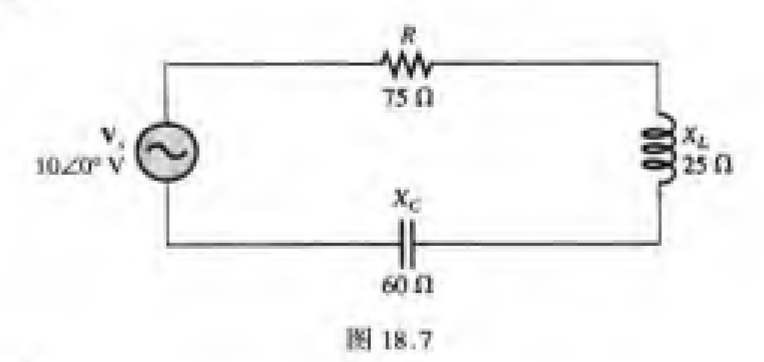


图 18.7

用欧姆定律求出电流：

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}} = \frac{10\angle 0°\ \text{V}}{82.8\angle -25°\ \Omega} = \mathbf{121\angle 25.0°\ mA}$$

用欧姆定律求出 R、L 和 C 上的电压：

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{IR} = (121\angle 25.0°\ \text{mA})(75\angle 0°\ \Omega) = \mathbf{9.08\angle 25.0°\ V}$$
$$\mathbf{V}_L = \mathbf{IX}_L = (121\angle 25.0°\ \text{mA})(25\angle 90°\ \Omega) = \mathbf{3.03\angle 115°\ V}$$
$$\mathbf{V}_C = \mathbf{IX}_C = (121\angle 25.0°\ \text{mA})(60\angle -90°\ \Omega) = \mathbf{7.26\angle -65.0°\ V}$$

相量图如图 18.8 所示，图中各量的大小表示有效值。注意 V_L 超前 V_R 90°，V_C 落后 V_R 90°，V_L 和 V_C 相差 180°。如果画出电流相量，应该与 V_R 同相。电流超前电压 25°，说明是容性电路（$X_C > X_L$）。由于参考相量选的是 x 轴方向上的 V_s，所以相量图与通常位置相比旋转了 25°。

练习：随着图 18.7 中电源频率的增长，电流如何变化？

图 18.8

18.2 节练习

1. 下列各项电压出现在某一串联 RLC 电路中。试求电源电压，已知 $\mathbf{V}_R = 24\angle 30°$ V，$\mathbf{V}_L = 15\angle 120°$ V，$\mathbf{V}_C = 45\angle -60°$ V。
2. 当 $R = 1.0\ \text{k}\Omega$，$X_C = 1.8\ \text{k}\Omega$，$X_L = 1.2\ \text{k}\Omega$ 时，电流是超前还是滞后于电源电压？
3. 求第 2 题中的总电抗。

18.3　串联谐振

在串联 RLC 电路中，$X_C = X_L$ 时会发生谐振，谐振发生时的频率叫做谐振频率，用 f_r 表示。学完本节后，读者应该能够：

■ 分析串联电路的谐振现象

- 定义串联谐振
- 求谐振时的阻抗
- 解释为什么谐振时电抗效应抵消
- 求串联谐振频率
- 计算谐振时的电流、电压以及相位角

图 18.9 说明了串联谐振的条件。

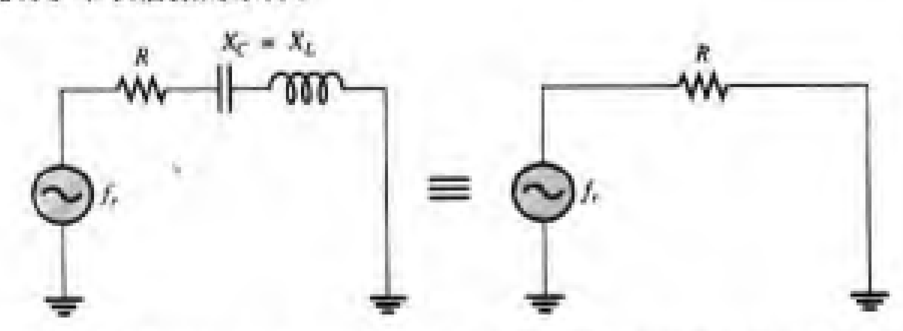


图 18.9 串联谐振，X_C 和 X_L 相互抵消，结果电路呈现出纯电阻性

在串联 *RLC* 电路中，谐振条件如下：当电路的感性电抗和容性电抗在幅度上相等时，二者相互抵消，*RLC* 电路就是纯电阻性电路。在串联 *RLC* 电路中，总阻抗如式(18.2)所示：

$$\mathbf{Z}_r = R + jX_L - jX_C$$

谐振时 $X_L = X_C$，式中没有虚部，所以阻抗是纯电阻性的。谐振条件用下面两式表示：

$$X_L = X_C \tag{18.4}$$

$$Z_r = R \tag{18.5}$$

例 18.4 对于图 18.10 所示的串联 *RLC* 电路，试求谐振时的 X_C 和 **Z**。

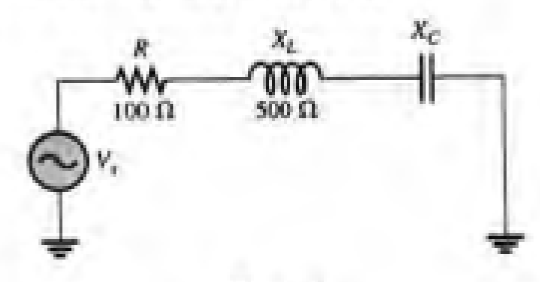


图 18.10

解：谐振时 $X_L = X_C$，因而 $X_C = X_L = \mathbf{500\ \Omega}$。谐振时的阻抗为：

$$Z_r = R + jX_L - jX_C = 100\ \Omega + j500\ \Omega - j500\ \Omega = \mathbf{100\angle 0^\circ\ \Omega}$$

这表明谐振时阻抗等于电阻值，这是因为两个电抗相等因而相互抵消。

练习：频率低于谐振频率时，电路是容性的还是感性的？

18.3.1 谐振时 X_C 和 X_L 相互抵消

在串联电路的谐振频率 f_r 上，电感和电容的电抗相等，并且由于串联时流经的电流相同($IX_C = IX_L$)，所以 *C* 和 *L* 上的电压幅度相等。同时，两者的相位相差 180°。

在任何给定的周期内，*C* 和 *L* 上的电压极性相反，如图 18.11(a)和图 18.11(b)所示。由于 *C* 和 *L* 上的电压幅度相等，相位相反，所以 *A* 点和 *B* 点之间的电压为零，如图 18.11(c)所示。由于

A 和 B 之间的电压为零，而两点间又有电流流过，所以总电抗必定为零。从图 18.11(d)所示的相量图可以看出，V_C 和 V_L 幅度相等，相位相差 180°。

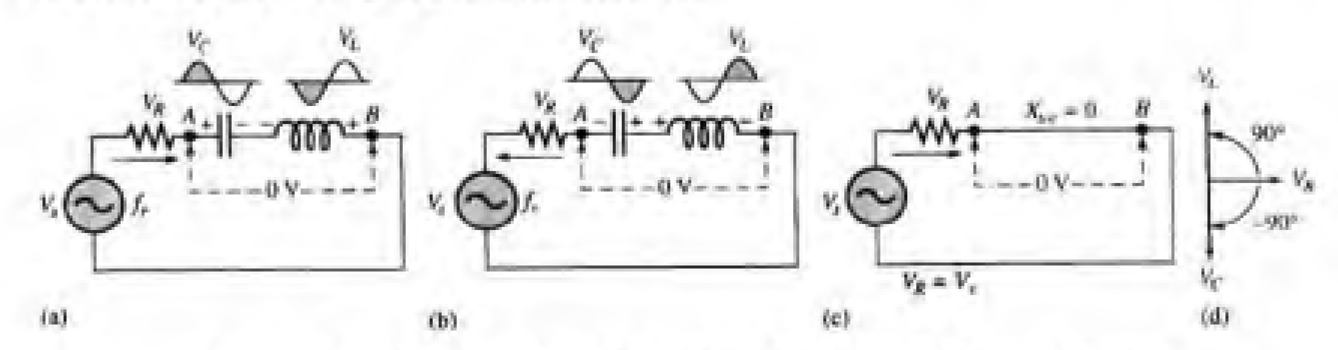


图 18.11　在谐振频率 f_r，C 和 L 上的电压大小相等。由于相位相差 180°，因而它们相互抵消，L和C两端(A到B)的电压为0 V，谐振时，A到B点实际上短路

18.3.2　串联谐振频率

对于给定的串联 RLC 电路，谐振只在一个特定的频率点上发生。谐振频率的推导从下式开始：

$$X_L = X_C$$

代入电抗公式：

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

两边乘以 $f_r/2\pi L$ 得：

$$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

两边开方，得串联谐振频率的计算公式：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (18.6)$$

例 18.5　对图 18.12 所示的电路求出串联谐振频率。

解：谐振频率如下：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(5\text{ mH})(47\text{ pF})}} = \mathbf{328\ kHz}$$

练习：图 18.12 所示电路中 $C = 0.01\ \mu F$ 时，谐振频率是多少？

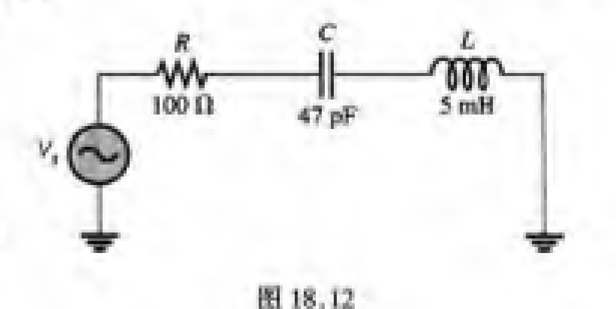


图 18.12

18.3.3　串联 RLC 阻抗

频率小于 f_r 时，$X_C > X_L$，这样电路就是容性的；在谐振频率点，$X_C = X_L$，所以电路是纯电阻性的；当频率大于 f_r 时，$X_C < X_L$，电路是感性的。

在谐振点阻抗幅度最小($Z = R$)，而在谐振点两边，阻抗幅度逐渐增大，图 18.13 说明了阻抗随频率变化的情况。在零频率点 X_C 和 Z 均为无限大，而 X_L 为零。这是由于频率为零时，电容相当于开路，电感相当于短路。频率增加时，X_C 减小，X_L 增大。在频率小于 f_r 时，X_C 大于 X_L，所以 Z 随着 X_C 的减小而减小。在频率点 f_r，$X_C = X_L$，$Z = R$。频率大于 f_r 时，X_L 大于 X_C，所以 Z 逐渐增加。

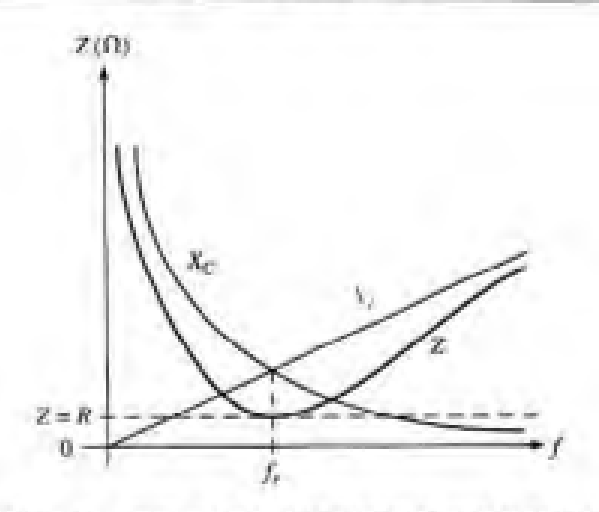


图 18.13 串联 RLC 电路的阻抗随频率变化的曲线

例 18.6 对于图 18.14 所示的电路，在下列各频率点上求阻抗的大小。

(a) f_r (b) 比 f_r 低 1000 Hz (c) 比 f_r 高 1000 Hz

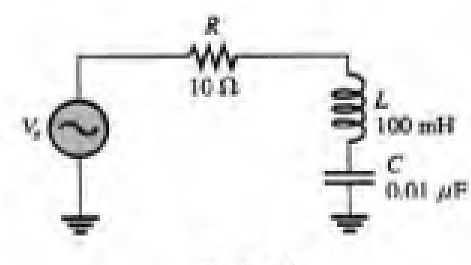


图 18.14

解：(a) 在 f_r 频率点，阻抗等于 R。

$$Z = R = \mathbf{10\ \Omega}$$

为了求比 f_r 小的频率，首先应求出 f_r：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(100\text{ mH})(0.01\ \mu\text{F})}} = 5.03\text{ kHz}$$

(b) 频率比 f_r 低 1000 Hz 时，电路频率和电抗如下：

$$f = f_r - 1\text{ kHz} = 5.03\text{ kHz} - 1\text{ kHz} = 4.03\text{ kHz}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(4.03\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 3.95\text{ k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(4.03\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 2.53\text{ k}\Omega$$

因此，频率等于 $f_r - 1$ kHz 时，阻抗等于：

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(10\ \Omega)^2 + (2.53\text{ k}\Omega - 3.95\text{ k}\Omega)^2} = \mathbf{1.42\ k\Omega}$$

(c) 频率比 f_r 高 1000 Hz 时，

$$f = 5.03\text{ kHz} + 1\text{ kHz} = 6.03\text{ kHz}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi(6.03\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 2.64\text{ k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi(6.03\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 3.79\text{ k}\Omega$$

因此，频率等于 $f_r + 1$ kHz 时，阻抗等于：

$$Z = \sqrt{(10\ \Omega)^2 + (3.79\text{ k}\Omega - 2.64\text{ k}\Omega)^2} = \mathbf{1.15\ k\Omega}$$

在部分(b)中，Z 是电容性的；在部分(c)中，Z 是电感性的。

练习：电路频率降至 4.03 kHz 以下时，阻抗的大小发生什么变换？频率大于 6.03 kHz 以上时，阻抗又会如何变化？

18.3.4 串联 RLC 电路中的电流和电压

在串联谐振频率，电流最大($I_{max} = V_s/R$)。在谐振点两侧，由于阻抗增大，所以电流逐渐减小。图 18.15(a) 显示了电流随频率变化的曲线；图 18.15(b) 显示了电阻两端电压 V_R 随频率变

化的情况，V_R 随电流而变化，在谐振点最大，当频率为零或者无穷大时，V_R 等于 0；V_C 和 V_L 的变化曲线分别如图 18.15(c)和图 18.15(d)所示。注意当频率 $f=0$ 时，由于电容相当于开路，所以 $V_C=V_s$。另外，当频率接近于无穷大时，V_L 接近 V_s，这是由于此时电感相当于开路的缘故。C 和 L 组合部分上的电压在谐振点以前随着频率的上升而减小，在谐振点达到最小值零，而后随着频率的增大而增大，如图 18.15(e)所示。

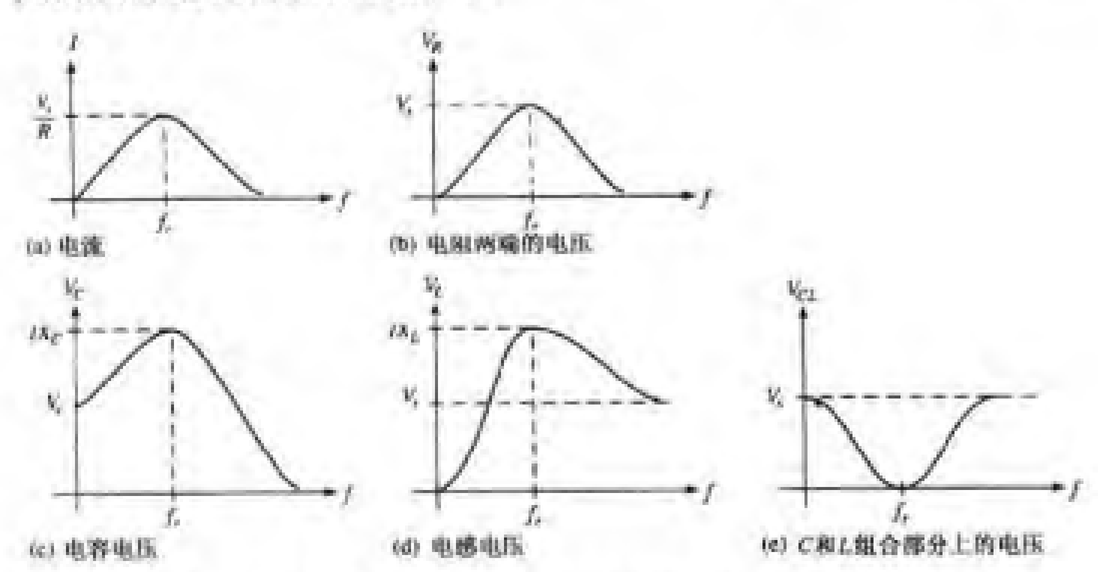


图 18.15 在串联 RLC 电路中，电流和电压的大小随频率变化的曲线。V_C 和 V_L 可以比 V_s 大很多，曲线的形状取决于电路的参数

谐振时各电压最大，但在高于和低于 f_r 时下降很快。谐振时，C 和 L 上的电压大小相等，但相位相差 180°，因而二者抵消。L 和 C 两端的电压为 0，$V_R=V_s$，如图 18.16 所示。V_L 和 V_C 可以比 V_s 大很多，这一点在后面将会看到。要记住，不管频率是多少，V_C 和 V_L 都是反相的，只有在谐振时才大小相等。

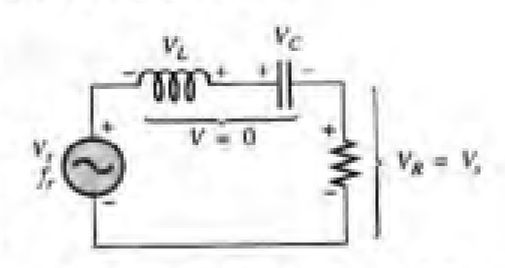


图 18.16 谐振时的串联 RLC 电路

例 18.7 对于图 18.17 所示的电路，试求谐振时的 I、V_R、V_L 和 V_C，谐振时的 X_L 和 X_C 值如图所示。

解：谐振时 I 最大，等于 V_s/R。

$$I=\frac{V_s}{R}=\frac{50\ \text{V}}{2.2\ \text{k}\Omega}=\mathbf{22.7\ mA}$$

运用欧姆定律，得各电压的大小如下：

$$V_R=IR=(22.7\ \text{mA})(2.2\ \text{k}\Omega)=\mathbf{50\ V}$$
$$V_L=IX_L=(22.7\ \text{mA})(1\ \text{k}\Omega)=\mathbf{22.7\ V}$$
$$V_C=IX_C=(22.7\ \text{mA})(1\ \text{k}\Omega)=\mathbf{22.7\ V}$$

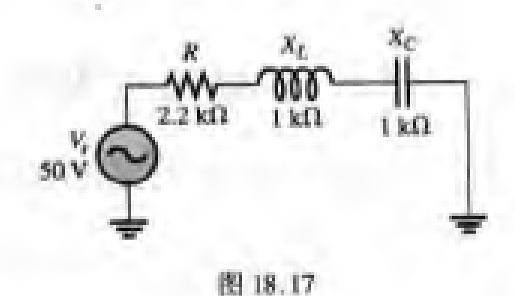


图 18.17

注意：电源的全部电压都降在了电阻上，V_L 和 V_C 大小相等，相位相反，二者相互抵消，使得电抗的总电压为 0。

练习：若图 18.17 所示电路中 $X_L=X_C=1\ \text{k}\Omega$，则谐振时电路的电流是多少？

18.3.5 串联 *RLC* 电路的相角

在频率小于谐振点，$X_C > X_L$，电流超前于电源电压，如图 18.18(a)所示；随着频率接近谐振点，相角逐渐变小，在谐振点相角为零，如图 18.18(b)所示。当频率大于谐振点时，$X_L > X_C$，电流滞后于电源电压，如图 18.18(c)所示。随着频率逐渐增大，相角接近 90°。相角随频率的变化曲线如图 18.18(d)所示。

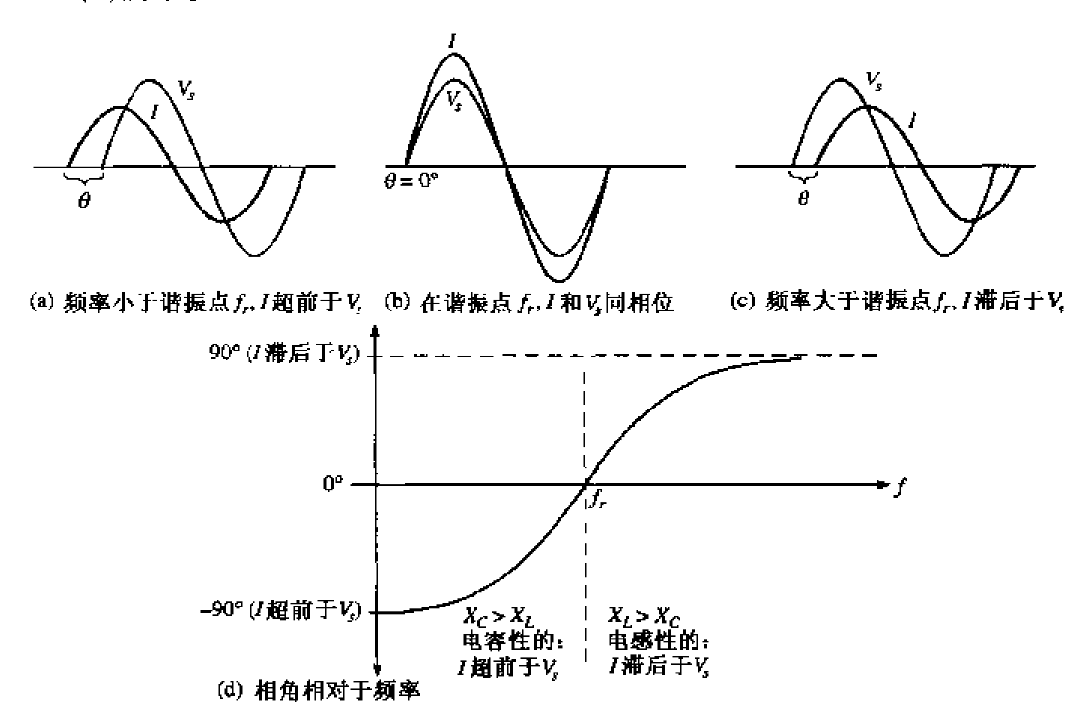


图 18.18 串联 *RLC* 电路中，相角随频率变化的曲线

18.3 节练习

1. 串联谐振的条件是什么？
2. 为什么谐振时电流最大？
3. 当 $C = 1000$ pF，$L = 1000$ μH 时，计算谐振频率。
4. 第 3 题中，在频率为 50 kHz 时，电路是容性的还是感性的？

第二部分：并联电抗电路

18.4 并联 *RLC* 电路的阻抗

本节将介绍如何确定并联 *RLC* 电路的阻抗和相角，另外还将探讨并联 *RLC* 电路的电导、电纳和导纳等。

学完本节后，读者应该能够：

- 计算并联 *RLC* 电路的阻抗
- 计算电导、电纳和导纳
- 确定电路是容性的还是感性的

图 18.19 是一个并联 RLC 电路。总阻抗可用倒数求和，再取倒数的方法求出，参见电阻并联公式。

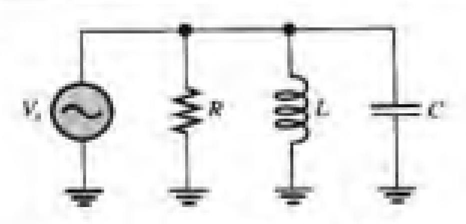
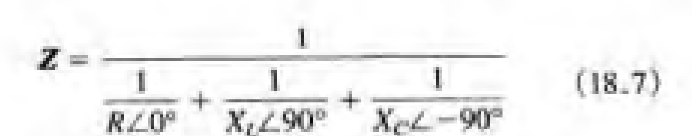


图 18.19　并联 RLC 电路

$$\frac{1}{\mathbf{Z}}=\frac{1}{R\angle 0^\circ}+\frac{1}{X_L\angle 90^\circ}+\frac{1}{X_C\angle -90^\circ}$$

或



$$\mathbf{Z}=\frac{1}{\dfrac{1}{R\angle 0^\circ}+\dfrac{1}{X_L\angle 90^\circ}+\dfrac{1}{X_C\angle -90^\circ}}\qquad(18.7)$$

例 18.8　求图 18.20 所示电路阻抗 **Z** 的极坐标形式。

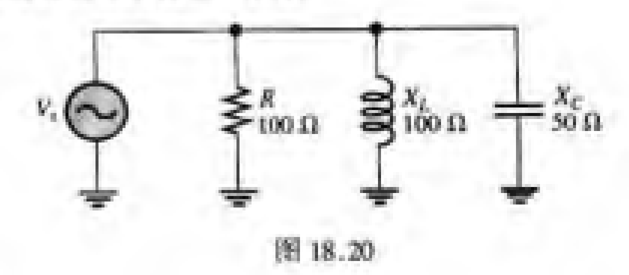


图 18.20

解：利用倒数和的公式：

$$\frac{1}{\mathbf{Z}}=\frac{1}{R\angle 0^\circ}+\frac{1}{X_L\angle 90^\circ}+\frac{1}{X_C\angle -90^\circ}=\frac{1}{100\angle 0^\circ\ \Omega}+\frac{1}{100\angle 90^\circ\ \Omega}+\frac{1}{50\angle -90^\circ\ \Omega}$$

运用复数除法规则：

$$\frac{1}{\mathbf{Z}}=10\angle 0^\circ\ \text{mS}+10\angle -90^\circ\ \text{mS}+20\angle 90^\circ\ \text{mS}$$

回顾一下：复数相除时，应减去分母的相角。

然后将每个量转换成直角坐标的形式。

$$\frac{1}{\mathbf{Z}}=10\ \text{mS}-j10\ \text{mS}+j20\ \text{mS}=10\ \text{mS}+j10\ \text{mS}$$

取倒数得到 **Z**，并将其转换成极坐标形式。

$$\mathbf{Z}=\frac{1}{10\ \text{mS}+j10\ \text{mS}}=\frac{1}{\sqrt{(10\ \text{mS})^2+(10\ \text{mS})^2}\angle\tan^{-1}\left(\dfrac{10\ \text{mS}}{10\ \text{mS}}\right)}$$

$$=\frac{1}{14.14\angle 45^\circ\ \text{mS}}=\mathbf{70.7\angle -45^\circ\ \Omega}$$

Z 的相角为负，说明电路是容性的，而电路的 $X_L > X_C$，所以可能会令人感到吃惊。然而，在并联电路中，X_L 和 X_C 中较小的那个量对总电流的影响更大。这很类似于并联电阻，小的电抗从总电流上分得的电流越多，对总阻抗的影响越大。

在这个电路中，总电流比总电压超前 45°。

练习：图 18.20 中电路的频率增加时，电路的阻抗是增加还是减少？

18.4.1　电导、电纳和导纳

第 16 章和第 17 章介绍了电导（G）、容性电纳（B_C）、感性电纳（B_L）和导纳（Y）的概念。相量公式如下：

$$\mathbf{G}=\frac{1}{R\angle 0^\circ}=G\angle 0^\circ\qquad(18.8)$$

$$\mathbf{B}_C = \frac{1}{X_C\angle -90^\circ} = B_C\angle 90^\circ = jB_C \quad (18.9)$$

$$\mathbf{B}_L = \frac{1}{X_L\angle 90^\circ} = B_L\angle -90^\circ = -jB_L \quad (18.10)$$

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{Z\angle \pm\theta} = Y\angle \mp \theta = G + jB_C - jB_L \quad (18.11)$$

我们知道,这些量的单位都是西门子(S)。

例 18.9　试求图 18.21 所示电路的电导、容性电纳、感性电纳、导纳和阻抗。

解:

$$\mathbf{G} = \frac{1}{R\angle 0^\circ} = \frac{1}{10\angle 0^\circ\ \Omega} = \mathbf{100\angle 0^\circ\ mS}$$

$$\mathbf{B}_C = \frac{1}{X_C\angle -90^\circ} = \frac{1}{10\angle -90^\circ\ \Omega} = \mathbf{100\angle 90^\circ\ mS}$$

$$\mathbf{B}_L = \frac{1}{X_L\angle 90^\circ} = \frac{1}{5\angle 90^\circ\ \Omega} = 200\angle -90^\circ\ \text{mS}$$

$$\mathbf{Y}_{tot} = G + jB_C - jB_L = 100\ \text{mS} + j100\ \text{mS} - j200\ \text{mS}$$
$$= 100\ \text{mS} - j100\ \text{mS} = 141.4\angle -45^\circ\ \text{mS}$$

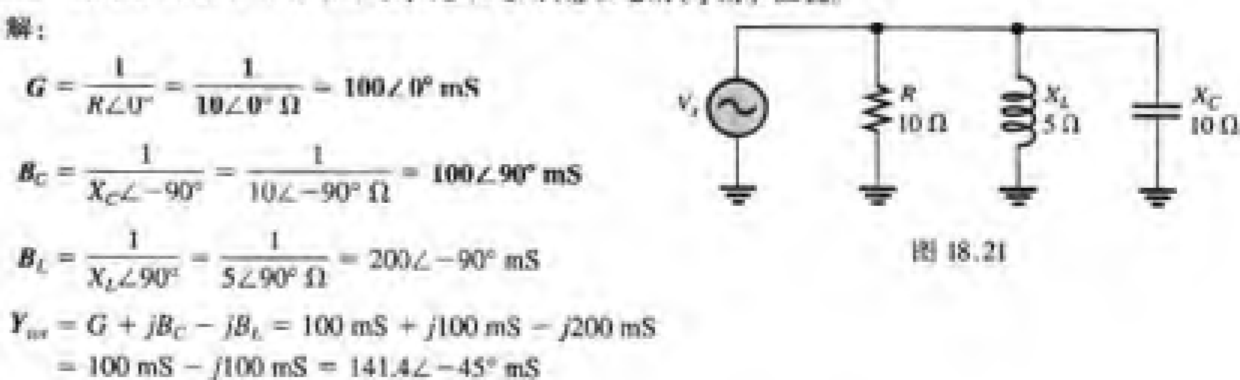


图 18.21

从 $\mathbf{Y}_{tot}$ 可以求出 $\mathbf{Z}_{tot}$,

$$\mathbf{Z}_{tot} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{tot}} = \frac{1}{141.4\angle -45^\circ\ \text{mS}} = \mathbf{7.07\angle 45^\circ\ \Omega}$$

练习:图 18.21 所示电路是容性的还是感性的?

18.4 节练习

1. 在某一并联 *RLC* 电路中,容性电抗是 60 Ω,感性电抗是 100 Ω。电路是容性的还是感性的?
2. 并联 *RLC* 电路中,$R = 1\ \text{k}\Omega$,$X_C = 500\ \Omega$,$X_L = 1.2\ \text{k}\Omega$,求导纳。
3. 第 2 题中的阻抗是多少?

18.5　并联 *RLC* 电路的分析

从上文可知,在并联电路中电抗越小,对电路的影响就越大。这是因为电抗越小,该支路电流就越大。

学完本节后,读者应该能够:

- 分析如何并联 *RLC* 电路
- 解释各电流相量在相位上的关系
- 计算阻抗、电流和电压

前面已经学习过,容性阻抗随着频率增大而减小,而感性阻抗随着频率增大而增大。在并联电路中,当频率较低时,感性电抗小于容性电抗,所以电路是感性的。随着频率增大,X_C 减小,X_L 增大,当 $X_C = X_L$ 时,就是并联谐振。频率进一步增大时,X_C 小于 X_L,电路就是容性的。

18.5.1 电流关系

在并联 RLC 电路中，容性支路和感性支路的电流在相位上相差 180°(忽略绕线电阻)。由于 I_C 和 I_L 是代数相加，所以这两条支路的总电流在幅度上实际上是二者的差。所以，C 和 L 上的总电流幅度总小于 I_C 和 I_L 二者中最大的电流幅度，如图 18.22 所示，从图 18.23 所示的波形图中也可以看到这点。当然，电阻支路上的电流总与两条电抗支路上的总电流相差 90°，如图 18.24中的相量图所示。

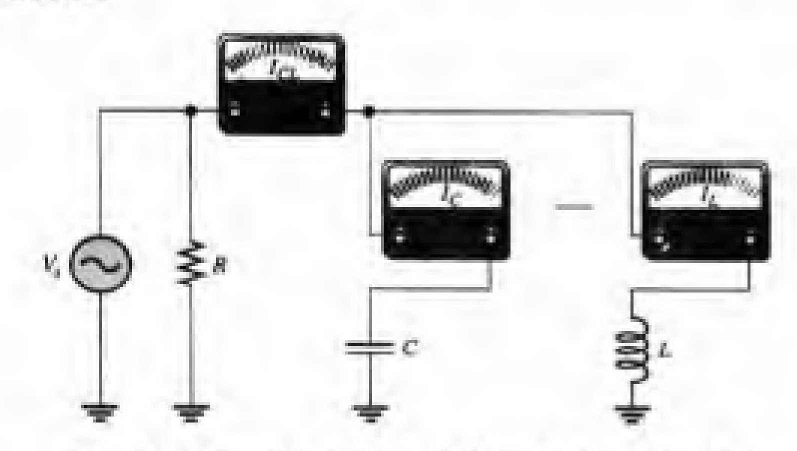


图 18.22　C 和 L 并联支路总电流是这两条支路上电流的差

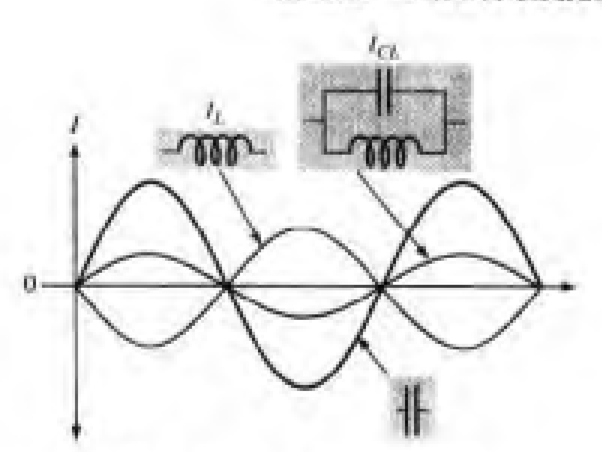


图 18.23　I_C 和 I_L 实际上相减

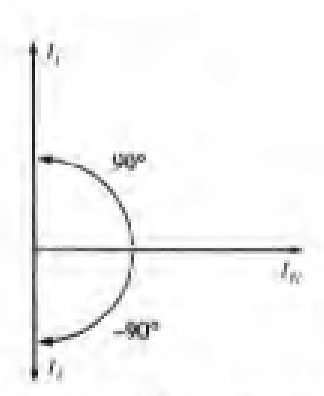


图 18.24　并联 RLC 电路典型的电流相量图

电路总电流由下式给出：

$$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{I_{CL}}{I_R}\right) \tag{18.12}$$

这里 $I_{CL} = I_C - I_L$，是流入 L 和 C 的总电流。

例 18.10　求图 18.25 所示电路中各支路电流和总电流，画相量图表示它们的关系。

解：运用欧姆定律，求各支路电流的相量形式：

$$I_R = \frac{V_s}{R} = \frac{5\angle 0°\ \text{V}}{2.2\angle 0°\ \Omega} = 2.27\angle 0°\ \text{A}$$

$$I_C = \frac{V_s}{X_C} = \frac{5\angle 0°\ \text{V}}{5\angle -90°\ \Omega} = 1\angle 90°\ \text{A}$$

$$I_L = \frac{V_s}{X_L} = \frac{5\angle 0°\ \text{V}}{10\angle 90°\ \Omega} = 0.5\angle 90°\ \text{A}$$

总电流是各支路电流的相量和,运用基尔霍夫定律得:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I}_{tot} &= \boldsymbol{I}_R + \boldsymbol{I}_C + \boldsymbol{I}_L \\ &= 2.27\angle 0^\circ\ \text{A} + 1\angle 90^\circ\ \text{A} + 0.5\angle -90^\circ\ \text{A} \\ &= 2.27\ \text{A} + j1\ \text{A} - j0.5\ \text{A} = 2.27\ \text{A} + j0.5\ \text{A} \end{aligned}$$

转换成极坐标形式,得:

$$\begin{aligned} I_{tot} &= \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{I_{CL}}{I_R}\right) \\ &= \sqrt{(2.27\ \text{A})^2 + (0.5\ \text{A})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{0.5\ \text{A}}{2.27\ \text{A}}\right) = \mathbf{2.32\angle 12.4^\circ\ A} \end{aligned}$$

总电流大小是2.32 A,超前 V_s 的相角为12.4°,图18.26所示为电路的电流相量图。

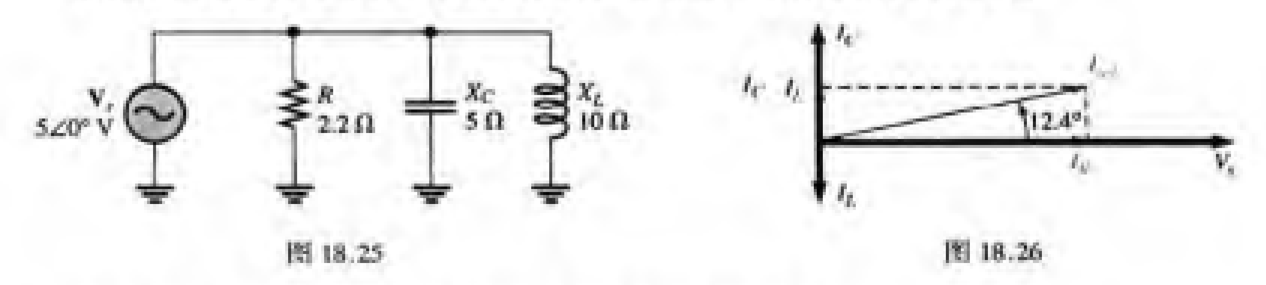


图 18.25

图 18.26

练习:图18.25所示电路的频率增加时,电路总电流是增加还是减少?

18.5 节练习

1. 在 *RLC* 并联电路中,$V_s = 12\ \text{V}$ 时,$R = 150\ \Omega$,$X_C = 100\ \Omega$,$X_L = 50\ \Omega$,求各支路电流。
2. 并联 *RLC* 电路的阻抗是 $2.8\angle -38.9^\circ\ \text{k}\Omega$,电路是容性的还是感性的?

18.6 并联谐振

在本节中,首先介绍理想并联电路的谐振条件。随后将考察把线圈电阻考虑在内时的实际情况。

学完本节后,读者应该能够:

- 分析并联谐振电路
- 描述理想电路中的并联谐振
- 描述非理想电路中的并联谐振
- 解释阻抗随频率如何变化
- 确定谐振时的电流及其相角
- 确定并联谐振频率

18.6.1 理想并联谐振条件

理想情况下,$X_C = X_L$ 时发生谐振。这时的频率叫做谐振频率,和串联谐振一样。当 $X_C = X_L$ 时,I_C 和 I_L 幅度相等,当然在相位上相差180°。所以,两条支路的电流相互抵消,两条支路总电流为零,如图18.27所示。

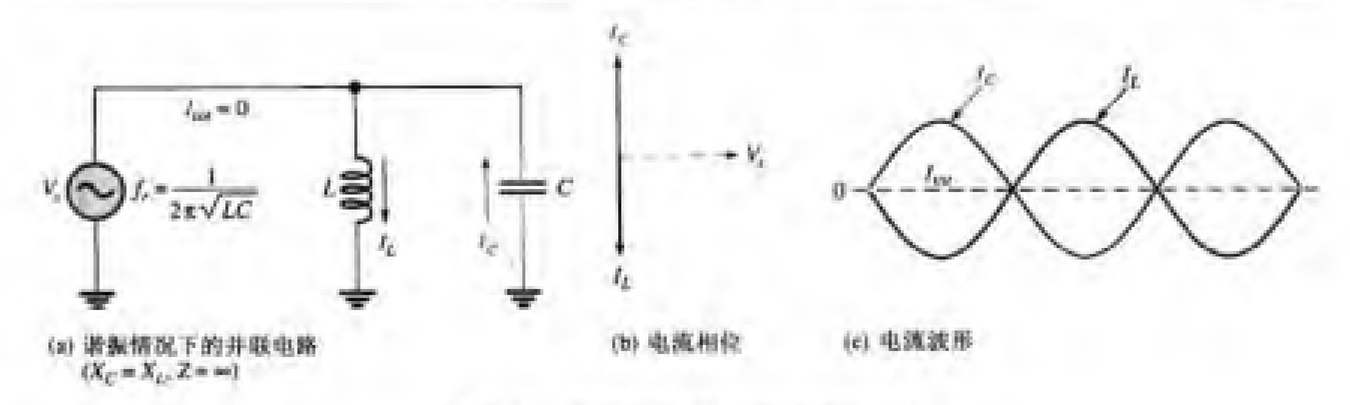


图 18.27 理想并联 LC 电路的谐振情况

因为总电流为零，并联 LC 电路的总阻抗为无穷大（∞）。理想谐振条件描述如下：

$$X_L = X_C$$
$$Z_r = \infty$$

18.6.2 理想并联谐振频率

对于理想并联谐振电路（无电阻），确定谐振频率的公式和串联谐振时的一样，如下所示：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

18.6.3 振荡电路

并联 LC 谐振电路经常叫做振荡电路。振荡电路是指：并联谐振电路的能量存储在线圈的磁场中和电容的电场中。假设电流按某一方向流动，当电感释放能量时电容充电，电流又向反方向流动，反之亦然。能量在电感和电容之间来回转移，图 18.28 说明了这个概念。

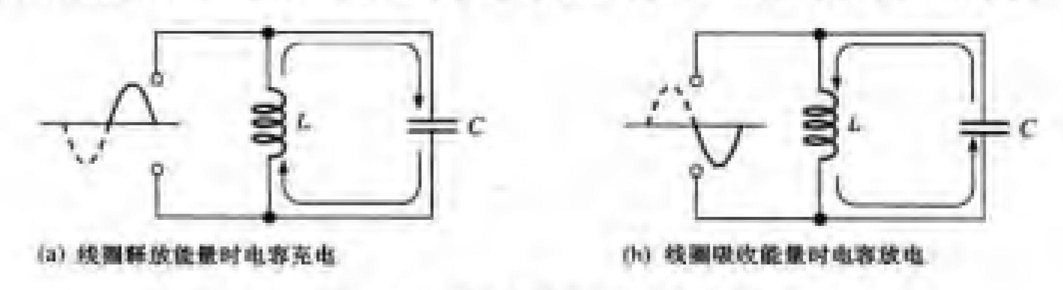


图 18.28 理想并联谐振振荡电路中的储能

18.6.4 阻抗随频率的变化

理想情况下，并联谐振电路的阻抗无穷大。实际情况下，在谐振点阻抗最大，在谐振点两侧，阻抗随频率向两侧逐渐减小，如图 18.29 所示。

在频率非常低时，X_L 非常小，X_C 非常大，所以总阻抗基本上等于感性支路的阻抗。随着频率的增大，阻抗也增大，但是由于 $X_L < X_C$，所以电路仍然是感性的，这样的状况一直维持到谐振点。在谐振点，$X_L \cong X_C$（$Q > 10$），阻抗达到最大值。频率大于谐振点时，电路是容性的（由于 $X_C < X_L$），而总阻抗开始减小。

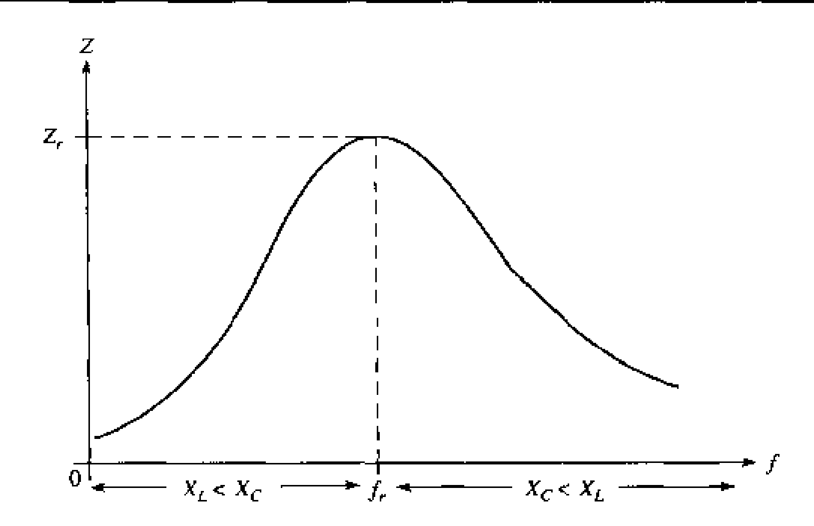


图 18.29 并联谐振电路的阻抗曲线,频率低于 f_r 时,电路呈感性;在频率等于 f_r 时,电路呈阻性;频率高于 f_r 时,电路呈容性

18.6.5 谐振时的电流和相角

在理想振荡电路中,谐振时,由于阻抗为无穷大,电源提供的总电流为零。在考虑线圈电阻的非理想情况下,在谐振频率点总电流并不等于零,电流的大小取决于谐振时的阻抗。

$$I_{tot} = \frac{V_s}{Z_r} \tag{18.13}$$

并联谐振时电路的相角为零,这是由于在谐振点,阻抗是纯电阻。

18.6.6 线圈电阻对并联谐振频率的影响

考虑线圈电阻时,谐振条件如下式所示:

$$2\pi f_r L\left(\frac{Q^2+1}{Q^2}\right) = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

其中 Q 是线圈的品质因数,大小等于 X_L/R_W。用 Q 表示 f_r,得:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\sqrt{\frac{Q^2}{Q^2+1}} \tag{18.14}$$

当 $Q \geqslant 10$ 时,Q 的影响可以估计为 1。

$$\sqrt{\frac{Q^2}{Q^2+1}} = \sqrt{\frac{100}{101}} = 0.995 \cong 1$$

所以,只要品质因数 $Q \geqslant 10$,并联谐振频率就几乎等于串联谐振频率。

$$f_r \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{对于} Q \geqslant 10$$

用电路元器件值精确表示的谐振频率为:

$$f_r = \frac{\sqrt{1-(R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{18.15}$$

这个精确公式很少使用。在很多实际情况下,简化的公式 $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 就足够了。在附录 C 中给出式(18.15)的推导。

例18.11 对于图18.30所示的电路，精确计算谐振频率和 Q。

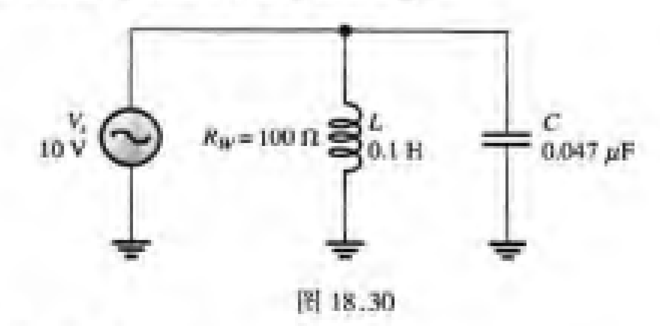


图 18.30

解：运用式(18.15)求谐振频率：

$$f_r = \frac{\sqrt{1-(R_W^2C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{1-[(100\ \Omega)^2(0.047\ \mu F)/0.1\ H]}}{2\pi\sqrt{(0.047\ \mu F)(0.1\ H)}} = \mathbf{2.32\ kHz}$$

为求计算品质因数 Q，先求 X_L：

$$X_L = 2\pi f_r L = 2\pi(2.32\ kHz)(0.1\ H) = 1.46\ k\Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{1.46\ k\Omega}{100\ \Omega} = \mathbf{14.6}$$

注意：由于 $Q>10$，近似公式 $f_r \cong 1/2\pi\sqrt{LC}$ 可用。

练习：当 R_W 小一些时，f_r 是小于还是大于 2.32 kHz？

18.6 节练习

1. 并联电路谐振时，阻抗是最小还是最大？
2. 并联电路谐振时，电流是最大还是最小？
3. 一理想并联谐振电路，假设 $X_L = 1500\ \Omega$，X_C 等于多少？
4. 并联振荡电路参数如下：$R_W = 4\ \Omega$，$L = 50\ mH$，$C = 10\ pF$，计算 f_r。
5. 当 $Q = 25$，$L = 50\ mH$，$C = 1000\ pF$ 时，计算 f_r。
6. 第5题中的 $Q = 2.5$ 时，f_r 为多少？

第三部分：串－并联电抗电路

18.7 串－并联 RLC 电路的分析

在本节中，将以实际的例子分析由 R、L 和 C 组成的串并联电路。另外，串并联电路的等效并联电路也是本节的内容，同时还将探讨非理想并联电路的谐振现象。

学完本节后，读者应该能够：

- 分析 RLC 串并联电路
- 会求解电流和电压
- 将串并联电路转换成等效的并联形式
- 针对非理想并联电路（线圈有电阻）进行并联谐振分析
- 检查电阻性负载对振荡电路的影响

下面的两个例子说明由电阻、电感和电容组成的串并联电路的分析方法。

例 18.12 图 18.31 中,求电容电压的极坐标形式。电路是容性的还是感性的?

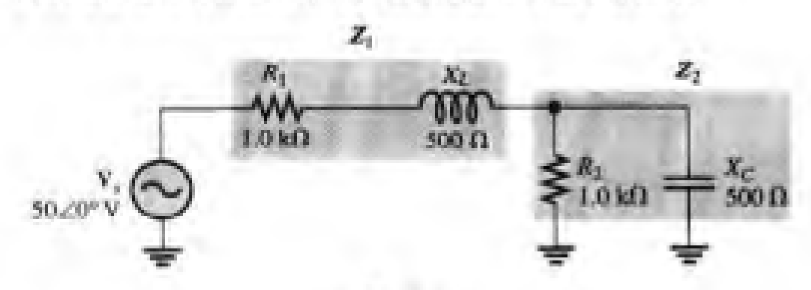


图 18.31

解: 应用分压公式,R_1 和 X_L 的串联阻抗叫 $\mathbf{Z}_1$,其直角坐标形式为:

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 + jX_L = 1000\ \Omega + j500\ \Omega$$

转换成极坐标形式为:

$$\mathbf{Z}_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R_1}\right)$$
$$= \sqrt{(1000\ \Omega)^2 + (500\ \Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{500\ \Omega}{1000\ \Omega}\right) = 1118\angle26.6°\ \Omega$$

R_2 和 X_C 的并联阻抗叫 $\mathbf{Z}_2$,其极坐标形式为:

$$\mathbf{Z}_2 = \left(\frac{R_2X_C}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}}\right)\angle-\tan^{-1}\left(\frac{R_2}{X_C}\right)$$
$$= \left[\frac{(1000\ \Omega)(500\ \Omega)}{\sqrt{(1000\ \Omega)^2 + (500\ \Omega)^2}}\right]\angle-\tan^{-1}\left(\frac{1000\ \Omega}{500\ \Omega}\right) = 447\angle-63.4°\ \Omega$$

将 $\mathbf{Z}_2$ 转换成直角坐标形式得:

$$\mathbf{Z}_2 = Z_2\cos\theta + jZ_2\sin\theta$$
$$= (447\ \Omega)\cos(-63.4°) + j447\sin(-63.4°) = 200\ \Omega - j400\ \Omega$$

总阻抗 $\mathbf{Z}_{tot}$ 用直角坐标形式表示为:

$$\mathbf{Z}_{tot} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 = (1000\ \Omega + j500\ \Omega) + (200\ \Omega - j400\ \Omega) = 1200\ \Omega + j100\ \Omega$$

转换为极坐标形式为:

$$\mathbf{Z}_{tot} = \sqrt{(1200\ \Omega)^2 + (100\ \Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{1200\ \Omega}\right) = 1204\angle4.76°\ \Omega$$

应用分压公式得 V_C:

$$\mathbf{V}_C = \left(\frac{\mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_{tot}}\right)\mathbf{V}_s = \left(\frac{447\angle-63.4°\ \Omega}{1204\angle4.76°\ \Omega}\right)50\angle0°\ \text{V} = \mathbf{18.6\angle-68.2°\ V}$$

因此,V_C 的大小为 18.6 V,相位落后于 V_s 为 68.2°。

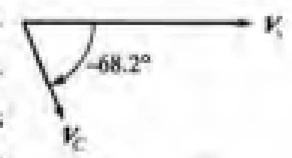


图 18.32

阻抗 $\mathbf{Z}_{tot}$ 的虚部为正,或其幅角为正,说明电路的感性作用多于容性。但由于 $\mathbf{Z}_{tot}$ 的相位角很小,所以电路的感性作用很弱。由于 $X_C = X_L = 500\ \Omega$,所以这一结果可能会令人吃惊。然而,由于电容与电阻并联,所以电容对总阻抗的作用比电感小。图 18.32 说明了 V_C 和 V_s 的相位关系。尽管 $X_C = X_L$,但是电路同样没有发生谐振,原因是 R_2 和 X_C 的并联使得总阻抗的虚部不为 0。从 $\mathbf{Z}_{tot}$ 的相角是 68.2°而不是 0°,可以看到这一点。

练习: 当 R_1 增大至 2.2 kΩ 时,求电容上电压的极坐标形式。

例 18.13 对于图 18.33 所示的电路，求 B 点到地的电压。

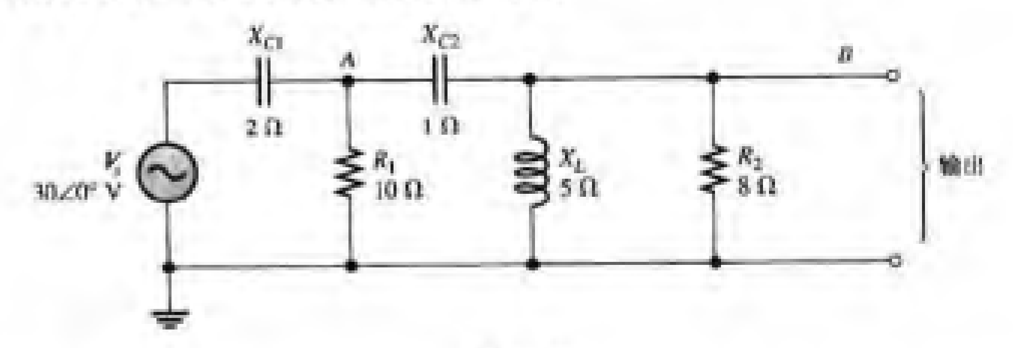


图 18.33

解：电压 V_B 是输出端电压，要想采用分压的方法，首先必须知道电压 V_A，所以第一步应求出 A 到地的阻抗。

R_2 先与 X_L 并联，再和 X_{C2} 串联，这种组合再与 R_1 并联。从 A 到地的阻抗叫 $\mathbf{Z}_A$，采用下面的步骤可求出 $\mathbf{Z}_A$。R_2 和 X_L 的并联叫 $\mathbf{Z}_1$。

$$\mathbf{Z}_1 = \left(\frac{R_2X_L}{\sqrt{R_2^2+X_L^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{R_2}{X_L}\right)$$
$$= \left(\frac{(8\ \Omega)(5\ \Omega)}{\sqrt{(8\ \Omega)^2+(5\ \Omega)^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{8\ \Omega}{5\ \Omega}\right) = 4.24\angle 58.0^\circ\ \Omega$$

下一步，将 $\mathbf{Z}_1$ 与 X_{C2} 串联得到 $\mathbf{Z}_2$。

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{X}_{C2} + \mathbf{Z}_1$$
$$= 1\angle -90^\circ\ \Omega + 4.24\angle 58^\circ\ \Omega = -j1\ \Omega + 2.25\ \Omega + j3.6\ \Omega$$
$$= 2.25\ \Omega + j2.6\ \Omega$$

将 $\mathbf{Z}_2$ 转换成极坐标形式得：

$$\mathbf{Z}_2 = \sqrt{(2.25\ \Omega)^2+(2.6\ \Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{2.6\ \Omega}{2.25\ \Omega}\right) = 3.44\angle 49.1^\circ\ \Omega$$

最后，$\mathbf{Z}_2$ 与 $\mathbf{R}_1$ 并联得到 $\mathbf{Z}_A$：

$$\mathbf{Z}_A = \frac{\mathbf{R}_1\mathbf{Z}_2}{\mathbf{R}_1+\mathbf{Z}_2} = \frac{(10\angle 0^\circ\ \Omega)(3.44\angle 49.1^\circ\ \Omega)}{10\ \Omega + 2.25\ \Omega + j2.6\ \Omega}$$
$$= \frac{34.4\angle 49.1^\circ\ \Omega}{12.25\ \Omega + j2.6\ \Omega} = \frac{34.4\angle 49.1^\circ\ \Omega}{12.5\angle 12.0^\circ\ \Omega} = 2.75\angle 37.1^\circ\ \Omega$$

简化后的电路如图 18.34 所示。

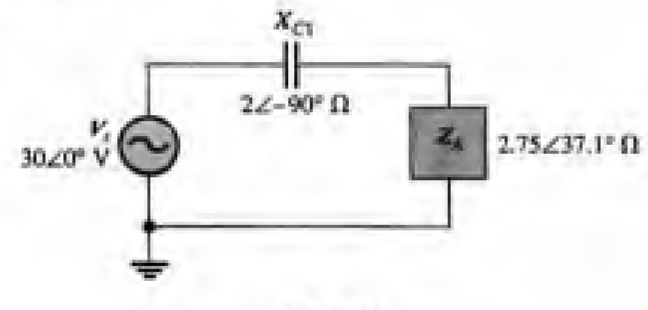


图 18.34

下一步,用分压公式求出图 18.33 中的电压 V_A,总阻抗为:

$$\begin{aligned}\mathbf{Z}_{tot} &= \mathbf{X}_{C1} + \mathbf{Z}_A \\ &= 2\angle -90^\circ\ \Omega + 2.75\angle 37.1^\circ\ \Omega = -j2\ \Omega + 2.19\ \Omega + j1.66\ \Omega \\ &= 2.19\ \Omega - j0.340\ \Omega\end{aligned}$$

转换成极坐标形式得:

$$Z_{tot} = \sqrt{(2.19\ \Omega)^2 + (0.340\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{0.340\ \Omega}{2.19\ \Omega}\right) = 2.22\angle -8.82^\circ\ \Omega$$

A 点电压为:

$$V_A = \left(\frac{\mathbf{Z}_A}{\mathbf{Z}_{tot}}\right)V_i = \left(\frac{2.75\angle 37.1^\circ\ \Omega}{2.22\angle -8.82^\circ\ \Omega}\right)30\angle 0^\circ\ \text{V} = 37.2\angle 45.9^\circ\ \text{V}$$

下一步,将 V_A 分压得 V_B,如图 18.35 所示。V_B 是输出端开路电压:

$$V_B = \left(\frac{\mathbf{Z}_1}{\mathbf{Z}_2}\right)V_A = \left(\frac{4.24\angle 58^\circ\ \Omega}{3.44\angle 49.1^\circ\ \Omega}\right)37.2\angle 45.9^\circ\ \text{V} = \mathbf{45.9\angle 54.8^\circ\ V}$$

令人奇怪的是:V_A 大于 V_s,V_B 大于 V_A。由于电抗性元件上电压反相的缘故,这一结果是可能的。要记住,X_C 和 X_L 趋于相互抵消。

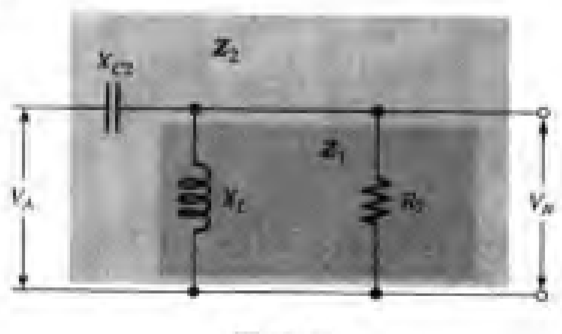


图 18.35

练习:图 18.33 中 C_1 上电压的极坐标形式是什么?

18.7.1 串并联到并联电路的转换

图 18.36 代表了一类非常重要的电路。该电路由并联 L 支路和 C 支路构成,同时在 L 支路考虑了电感的线圈电阻,并把它当做 L 支路的一个串联电阻。

将图 18.36 中的串并联电路看做图 18.37 中等效的并联形式是非常有帮助的。

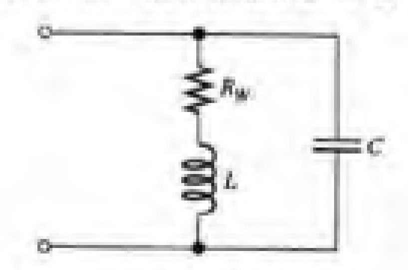
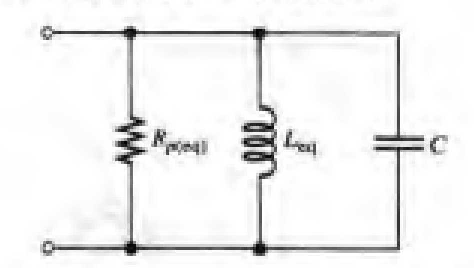



图 18.36 串并联 RLC 电路($Q = X_L/R_W$)



8.37 图 18.36 所示电路的并联等效电路形式

等效电感 L_{eq} 和等效并联电阻 $R_{p(eq)}$ 由下面的公式计算:

$$L_{eq} = L\left(\frac{Q^2 + 1}{Q^2}\right) \tag{18.16}$$

$$R_{p(eq)} = R_W(Q^2 + 1) \tag{18.17}$$

其中，Q 是线圈的品质因数，大小等于 X_L/R_W。这些公式的推导十分复杂，所以在这里没有给出。注意当 $Q \geq 10$ 时，L_{eq}的值和原来 L 的值接近。比如，如果 $L = 10$ mH，$Q = 10$，则：

$$L_{eq} = 10\ \text{mH}\left(\frac{10^2 + 1}{10^2}\right) = 10\ \text{mH}(1.01) = 10.1\ \text{mH}$$

两个电路等效的意思是指：在一给定的频率下，如果加在两个电路上的电源电压相等，那么两个电路中的总电流大小及相角应该相同。从根本上讲，等效电路使电路的分析变得更简便。

例 18.14　在给定频率下，将图 18.38 中的电路转换成并联等效电路的形式。

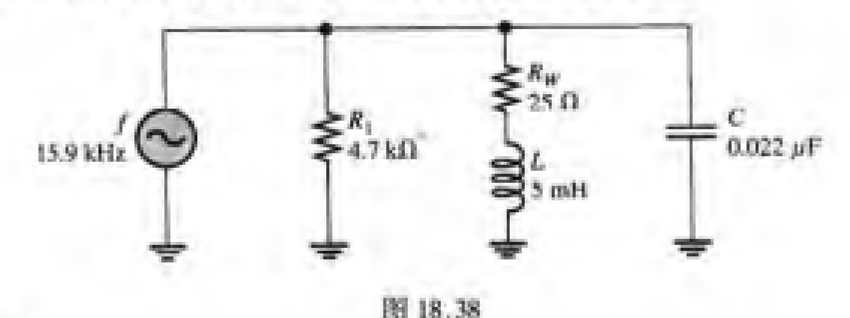


图 18.38

解：求出感性电阻：

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(15.9\ \text{kHz})(5\ \text{mH}) = 500\ \Omega$$

线圈的品质因数 Q 等于：

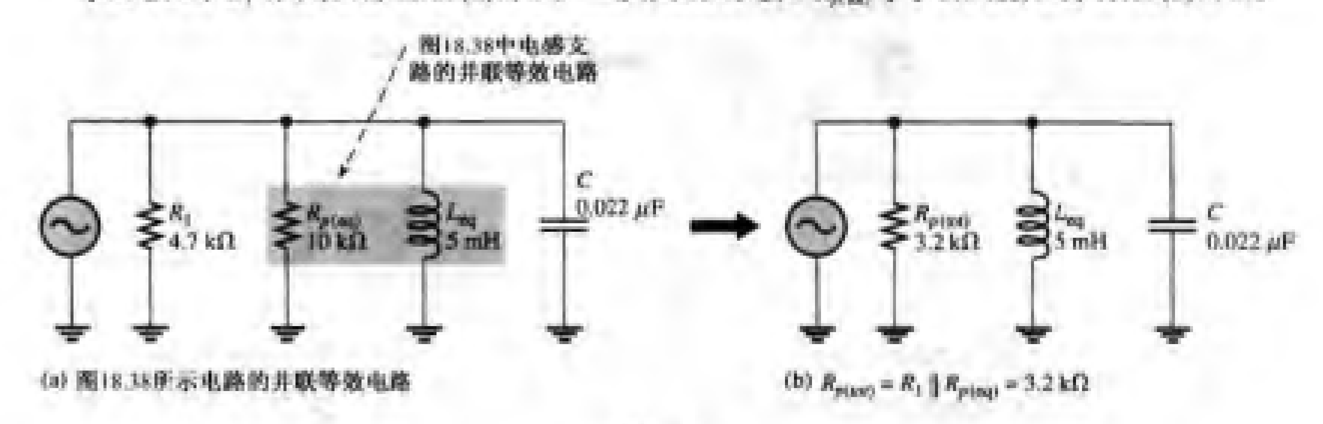
$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{500\ \Omega}{25\ \Omega} = 20$$

因为 $Q > 10$，所以 $L_{eq} \cong L = 5$ mH。

等效并联电阻等于：

$$R_{p(eq)} = R_W(Q^2 + 1) = (25\ \Omega)(20^2 + 1) = 10\ \text{k}\Omega$$

等效电阻与 R_1 并联，如图 18.39(a)所示。二者并联后的电阻 $R_{p(tot)}$ 等于 3.2 kΩ，如图 18.39(b)所示。



(a) 图18.38所示电路的并联等效电路　　(b) $R_{p(tot)} = R_1 \| R_{p(eq)} = 3.2\ \text{k}\Omega$

图 18.39

练习：对于图 18.38 所示的电路，当 $R_W = 10\ \Omega$ 时，求出其并联等效电路。

18.7.2　非理想电路中的并联谐振条件

在 18.6 节介绍了理想并联 LC 谐振电路。现在，我们探讨在振荡电路中考虑线圈电阻时的谐振情况。图 18.40 展示了一个非理想振荡电路及其并联 RLC 等效电路。

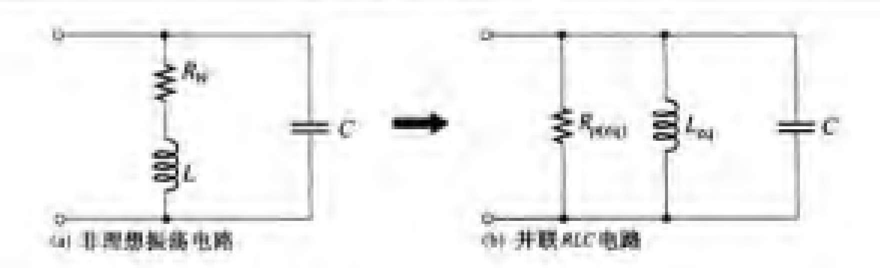


图 18.40 含有线圈电阻的并联谐振电路的实际处理

电路谐振时的品质因数 Q 简单而言等于线圈的 Q 值，用下面的公式计算：

$$Q = \frac{X_L}{R_W}$$

等效电感和等效并联电阻的计算如式(18.16)和式(18.17)所示：

$$L_{eq} = L\left(\frac{Q^2 + 1}{Q^2}\right)$$

$$R_{p(eq)} = R_W(Q^2 + 1)$$

当 $Q \geq 10$ 时，$L_{eq} \cong L$。

在并联谐振点，

$$X_{L(eq)} = X_C$$

在并联等效电路中，$R_{p(eq)}$ 和理想线圈以及电容并联，所以，L 和 C 并联是理想的振荡回路。在谐振点，其阻抗无穷大，如图 18.41 所示。所以，非理想振荡电路谐振时的总阻抗可简化为等效并联电阻：

$$Z_r = R_W(Q^2 + 1) \tag{18.18}$$

式(18.18)的推导在附录 C 中给出。

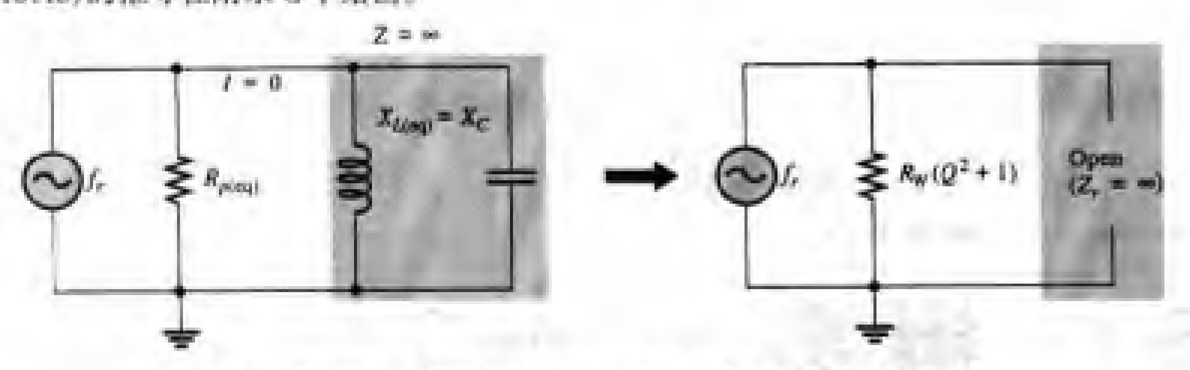


图 18.41 谐振时，LC 并联部分看起来开路，从电源看到的电阻只有 $R_{p(eq)}$

例 18.15 求图 18.42 所示电路谐振时的阻抗($f_r \cong 17\ 794$ Hz)。

解：应用式(18.18)计算阻抗前，先计算感性电抗以求出品质因数。

$$X_L = 2\pi f_r L = 2\pi(17\ 794\ \text{Hz})(8\ \text{mH}) = 894\ \Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{894\ \Omega}{50\ \Omega} = 17.9$$

$$Z_r = R_W(Q^2 + 1) = 50\ \Omega(17.9^2 + 1) = \mathbf{16.1\ k\Omega}$$

图 18.42

练习：当 $R_W = 10\ \Omega$ 时，求 Z_r。

18.7.3　外部负载电阻对振荡电路的影响

在大多数实际情况下，外部负载电阻和非理想振荡电路并联，如图18.43(a)所示。很明显，外部电阻 R_L 将会消耗更多的电源能量，这样将使整个电路的品质因数 Q 降低。外部负载电阻实际上和线圈的并联等效电阻 $R_{p(eq)}$ 并联，这两个电阻构成总的并联电阻 $R_{p(tot)}$，如图 18.43(b)所示。

$$R_{p(tot)} = R_L \parallel R_{p(eq)}$$

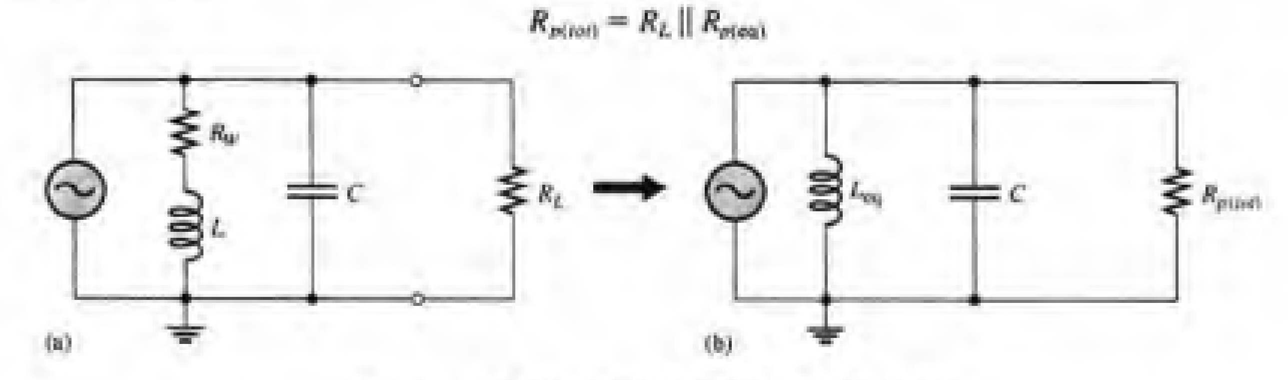


图 18.43　与负载电阻并联的振荡电路及其等效电路

总的 Q 用 Q_O 表示，并联 RLC 电路与串联电路的 Q 有不同的表示。

$$Q_O = \frac{R_{p(tot)}}{X_{L(eq)}} \tag{18.19}$$

可以看出，负载电阻降低了电路总的 Q(如果没有负载就等于线圈的 Q 值)。

18.7 节练习

1. 某一谐振电路的电感是 10 μH，其线圈电阻是 20 Ω，与 0.22 μF 的电容相并联。若 $Q=8$，求其并联等效电路。
2. 一个电感线圈的电感是 20 mH，其线圈电阻是 10 Ω，在频率为 1 kHz 时，求其等效并联电感和电阻。

第四部分：专题讨论

18.8　谐振电路的带宽

前面已经介绍过，串联 RLC 电路谐振时，由于电抗相互抵消，所以在谐振点电流最大。而并联 RLC 电路中谐振时感性电流和容性电流相互抵消，所以此时电流最小。在本节中，将探讨电路的作用如何与另外一个特性即带宽有关。

学完本节后，读者应该能够：

- 确定谐振电路的带宽
- 讨论串联与并联谐振电路的带宽
- 描述带宽公式
- 掌握半功率点频率的求法
- 定义选频特性
- 解释 Q 如何影响带宽

18.8.1 串联谐振电路

在谐振点(中心频率),串联 *RLC* 电路中的电流最大;在谐振点的两侧,电流逐渐减小。带宽有时候用 *BW* 表示,是谐振电路非常重要的一个特性。带宽是这样一个频率范围:在这个范围内,电流等于或大于谐振时电流的 70.7%。

图 18.44 说明了串联 *RLC* 电路的响应曲线上带宽的概念。注意,f_1 是电流等于 $0.707I_{max}$ 时的频率,通常叫做下临界频率。f_2 是使电流等于 $0.707I_{max}$ 的另外一个频率,叫做上临界频率 f_2。f_1 和 f_2 有时候叫做 -3 dB 频率点、截止频率点和半功率点。这些术语的意义在下面的章节中讨论。

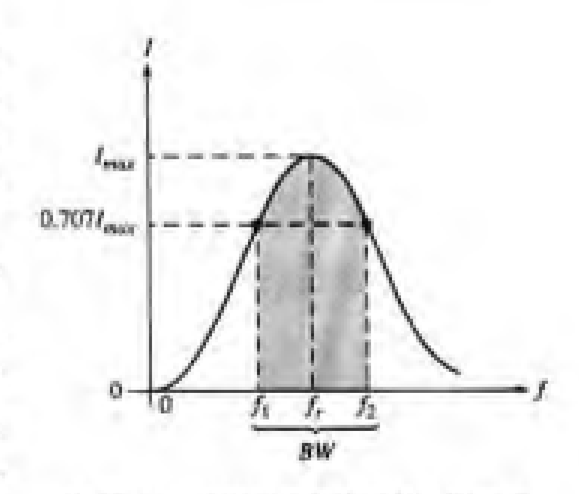


图 18.44 串联谐振响应曲线 *I* 的带宽

例 18.16 一串联谐振电路,电流的最大值为 100 mA。在临界频率时电流是多少?

解: 在临界频率时电流等于最大值的 70.7%。

$$I_{f1} = I_{f2} = 0.707I_{max} = 0.707(100\text{ mA}) = \mathbf{70.7\ mA}$$

练习: 一串联谐振电路,在临界频率时电流等于 25 mA,谐振时电流是多少?

18.8.2 并联谐振电路

对于并联谐振电路,阻抗在谐振点最大,所以总电流最小。采用与串联谐振电路中电流曲线相同的方式,并联电路在阻抗曲线上定义带宽。当然,在 f_r 处,阻抗 Z 最大。f_1 是下临界频率,f_2 是上临界频率,在 f_1 和 f_2 处,$Z = 0.707Z_{max}$。带宽就是 f_1 和 f_2 范围内的频带宽度,如图 18.45 所示。

图 18.45 并联谐振响应曲线 Z_{tot} 的带宽

18.8.3 带宽公式

对于并联和串联谐振电路,带宽都是临界频率之间的频带范围。在临界频率点处,响应曲线(I 或 Z)等于最大值的 0.707。所以带宽就是 f_2 和 f_1 之间的差值:

$$BW = f_2 - f_1 \tag{18.20}$$

理想情况下,f_r 是 f_1 和 f_2 的中心点,所以可以用下面的公式计算:

$$f_r = \frac{f_1 + f_2}{2} \tag{18.21}$$

例 18.17 一谐振电路的下临界点频率是 8 kHz,上临界点频率是 12 kHz,求带宽及中心频率。

解:

$$BW = f_2 - f_1 = 12\text{ kHz} - 8\text{ kHz} = \mathbf{4\ kHz}$$

$$f_r = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{12\text{ kHz} + 8\text{ kHz}}{2} = \mathbf{10\ kHz}$$

练习: 当谐振电路的带宽是 2.5 kHz,中心频率是 8 kHz 时,求电路的上下临界频率。

18.8.4 半功率点频率

前面已经提到，上下临界频率点有时候叫做半功率点频率。这个术语源于下面的事实：电源在这两个点上提供的功率是在谐振点上提供功率的一半。下面将在串联电路中证明这一点，同样的结果也可以应用到并联电路中。在谐振点：

$$P_{max} = I_{max}^2 R$$

在 f_1 或 f_2 频率点的功率为：

$$P_{f1} = I_{f1}^2 R = (0.707 I_{max})^2 R = (0.707)^2 I_{max}^2 R = 0.5 I_{max}^2 R = 0.5 P_{max}$$

18.8.5 选择性

图 18.44 和图 18.55 所示的是选择曲线。选择性表示谐振电路对特定频率信号的响应效果如何，以及如何区别对待不同的频率。频带越窄，选择性越强。

我们通常认为在通频带内，电路完全接受这些频率上的信号，而在通频带外，则完全拒绝，实际情况并非如此。通频带外的其他频率的信号并没有完全滤除掉，然而，其幅度大大减小。频率离临界频率越远的信号，滤除的程度越大，如图 18.46(a)所示。理想的选择曲线如图 18.46(b)所示。

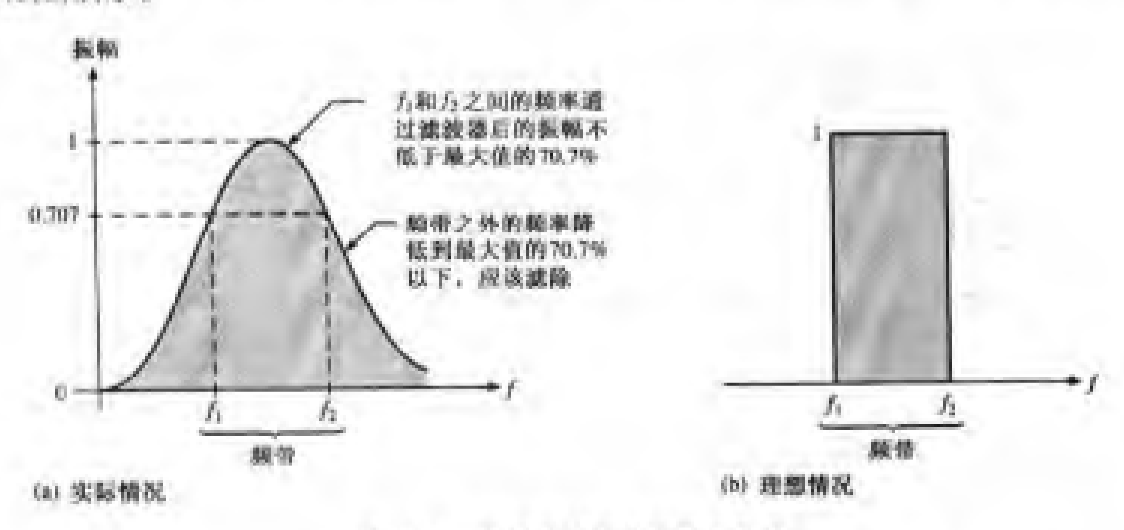


图 18.46 带通滤波器的选择性曲线

从图 18.46 中可以看出，另外一个影响选择性的因素是曲线的陡峭程度。在临界频率点，曲线下降得越快，电路的选择性就越好，这是因为只响应带宽内的频率信号。图 18.47 是三种不同选择程度的曲线对比。

18.8.6 Q 对带宽的影响

Q 值越大，带宽越窄。Q 值越小，带宽越宽。带宽和谐振电路中 Q 的关系用下式表示：

$$BW = \frac{f_r}{Q} \tag{18.22}$$

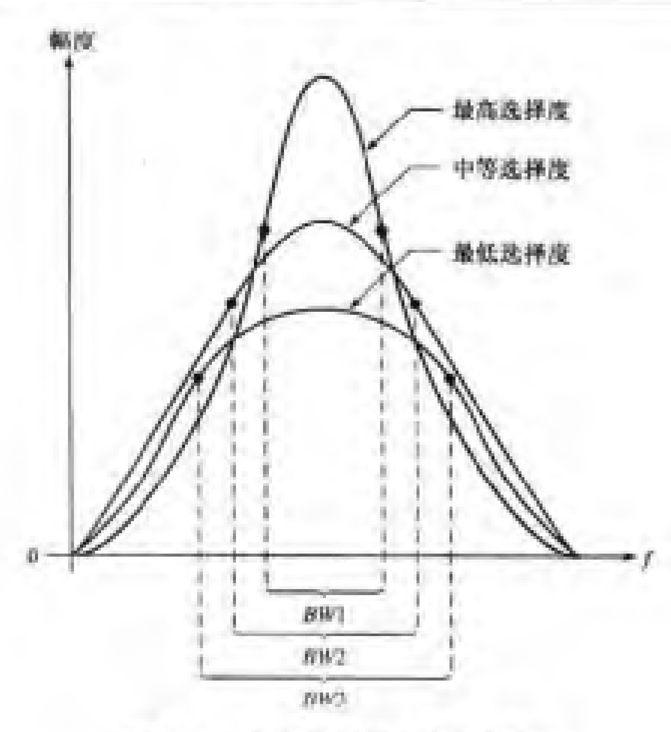


图 18.47 不同选择程度的曲线对比

例 18.18 图 18.48 中每个电路的带宽是多少?

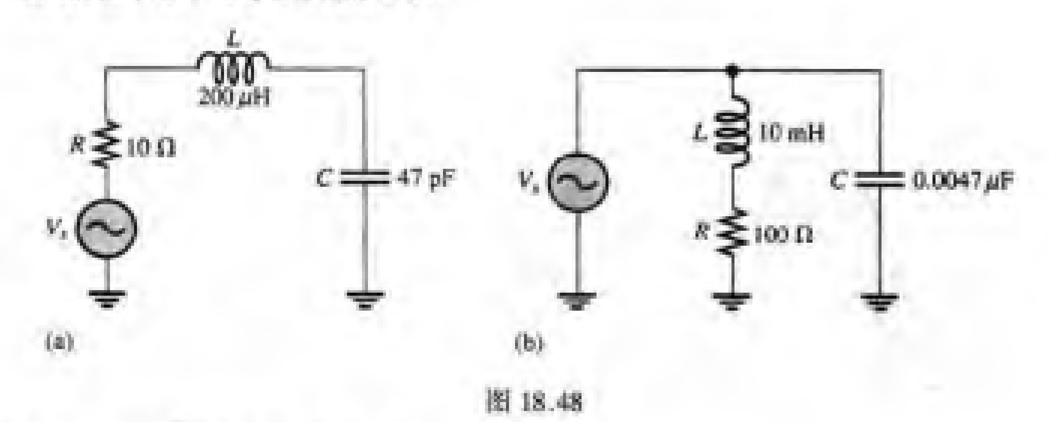


图 18.48

解:对于图 18.48(a)中的电路,带宽如下:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(200\ \mu\text{H})(47\ \text{pF})}} = 1.64\ \text{MHz}$$

$$X_L = 2\pi f_r L = 2\pi(1.64\ \text{MHz})(200\ \mu\text{H}) = 2.06\ \text{k}\Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2.06\ \text{k}\Omega}{10\ \Omega} = 206$$

$$BW = \frac{f_r}{Q} = \frac{1.64\ \text{MHz}}{206} = \mathbf{7.96\ kHz}$$

对于图 18.48(b)中的电路,

$$f_r = \frac{\sqrt{1-(R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}} \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(10\ \text{mH})(0.0047\ \mu\text{F})}} = 23.2\ \text{kHz}$$

$$X_L = 2\pi f_r L = 2\pi(23.2\ \text{kHz})(10\ \text{mH}) = 1.46\ \text{k}\Omega$$

$$Q=\frac{X_L}{R}=\frac{1.46\ \text{k}\Omega}{100\ \Omega}=14.6$$

$$BW=\frac{f_r}{Q}=\frac{23.2\ \text{kHz}}{14.6}=\mathbf{1.59\ kHz}$$

练习：将图 18.48(a)所示电路的 C 改为 1000 pF，试求带宽。

18.8 节练习

1. 当 $f_2=2.2$ MHz，$f_1=1.8$ MHz 时，带宽是多少？
2. 当一谐振电路具有第 1 题的临界频率时，中心频率是多少？
3. 谐振时功率为 1.8 W，在上临界频率时功率是多少？
4. Q 值大意味着带宽窄还是宽？

18.9　谐振的应用

谐振电路有很广泛的应用，尤其在通信系统中。在本节中，简要介绍少数几个通信系统的应用。本节的目的不在于解释这些系统如何工作，而在于说明谐振电路在电子通信中的重要性。

学完本节后，读者应该能够：

- 讨论谐振电路的一些应用
- 描述一个调频放大应用系统
- 描述天线耦合
- 描述调谐放大器
- 描述接收系统中的信号分离技术
- 描述收音机接收模块

18.9.1　调频放大器

调频放大器是这样一类电路，即能够放大特定频率范围内的信号。典型情况是，一个放大器和一个并联谐振电路组合使用来实现选择性。一般来讲，很宽频带范围内的信号都能通过放大器并被放大，而谐振电路只允许很窄带宽内的频率信号通过。可变电容可以调节可通过的信号频带，以实现选择不同的信号，如图 18.49 所示。

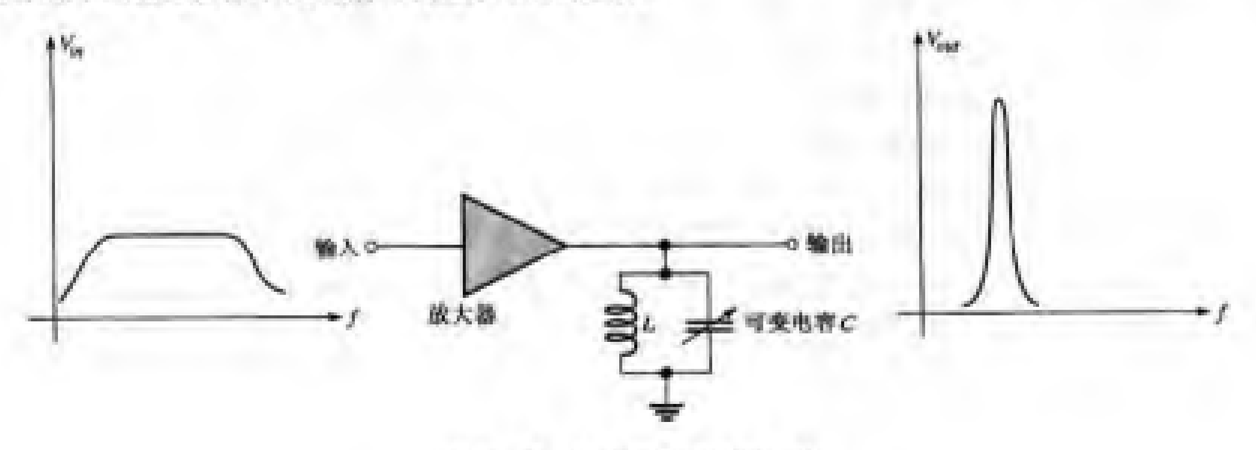


图 18.49　基本调频带通放大器

18.9.2 天线输入到接收器

收音机信号从发射机发出,以电磁波的形式在大气中传播。当电磁波"碰见"接收天线,电压被感应。在很大的电磁波频率范围内,只能提取特定频率或一个有限频率范围内的信号。图 18.50 展示了典型的模型:从天线接收的信号作为耦合变压器的输入,并在变压器的次级线圈上并联一个可变电容,形成一个并联谐振电路。

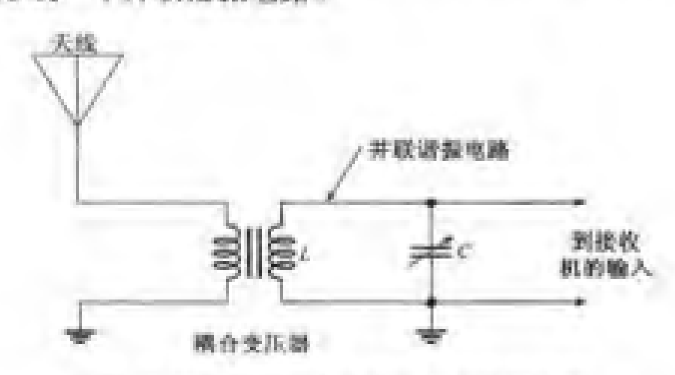


图 18.50 信号来自天线的耦合谐振电路

18.9.3 接收机中的双调频耦合变压器

在某些通信接收系统中,将调频放大器采用变压器耦合来提高放大效果。可变电容和初级、次级线圈并联,这样就有效地创建了两个耦合在一起的并联谐振带通滤波器,如图 18.51 所示。这项技术能够得到更宽的带宽和更陡峭的响应曲线,这样就提高了所需频带的选择性。

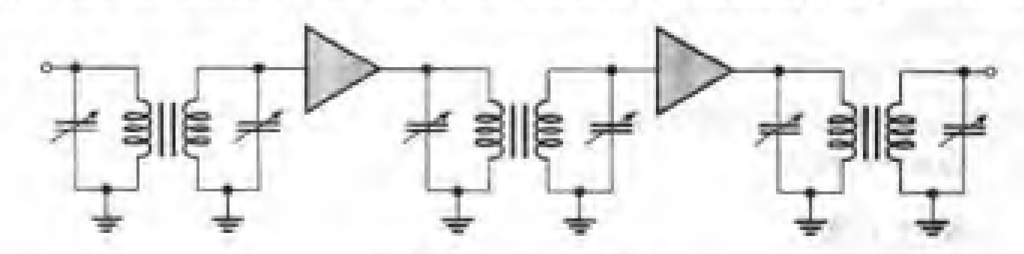


图 18.51 双调频放大器

18.9.4 电视机中的信号接收和分离技术

电视机必须同时处理音频(声音)和视频(图像)信号。每个电视发射台都分配了 6 MHz 的带宽,信道 2 的频带是 54 MHz 到 59 MHz 之间,信道 3 的频带在 60 MHz 到 65 MHz 之间,一直到信道 13 的频带在 210 MHz 到 215 MHz 之间。可以在电视机接收器前端通过调频放大器选择这些信道中的任何一个。不管选择的是哪一个信道,接收机前端的输出信号频带范围为 41 MHz 到 46 MHz 之间。这个频带叫做中频带(IF, intermediate frequency),既包括音频信号,又包括视频信号。将放大器调频到中频带,对信号进行放大,然后把信号送给视频放大器。

在视频放大器的输出信号加到电视机显像管之前,要通过一个 4.5 MHz 的带阻滤波器(叫"陷波")去除音频信号,如图 18.52 所示。带阻滤波器把音频信号和视频信号分离。同时,视频放大器的输出也通过一个带通电路,其谐振频率调在音频载波频率 4.5 MHz 上。随后音频信号经过处理,并且输入到扬声器,如图 18.52 所示。

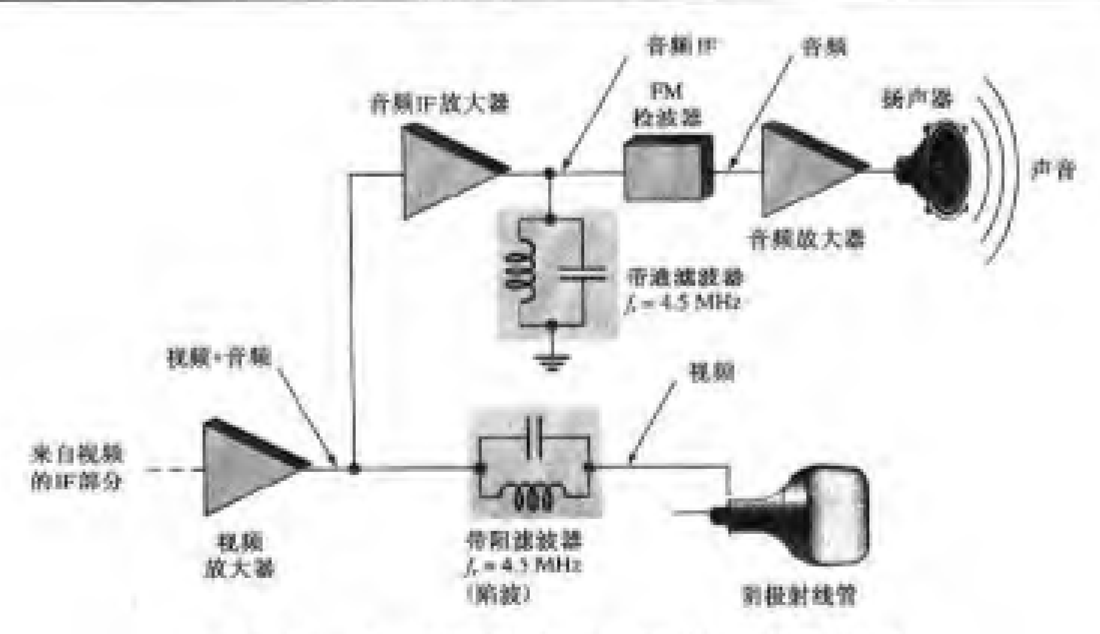


图 18.52　说明滤波器应用的电视接收机的简化部分示图

18.9.5　超外差式收音机

滤波器的另外一个应用是调幅接收机。调幅广播的通频带在 535 kHz 到 1605 kHz 之间。每个电台在这个频率范围内都分配了一个很窄的频带。超外差式调幅收音机的简化框图如图 18.53 所示。

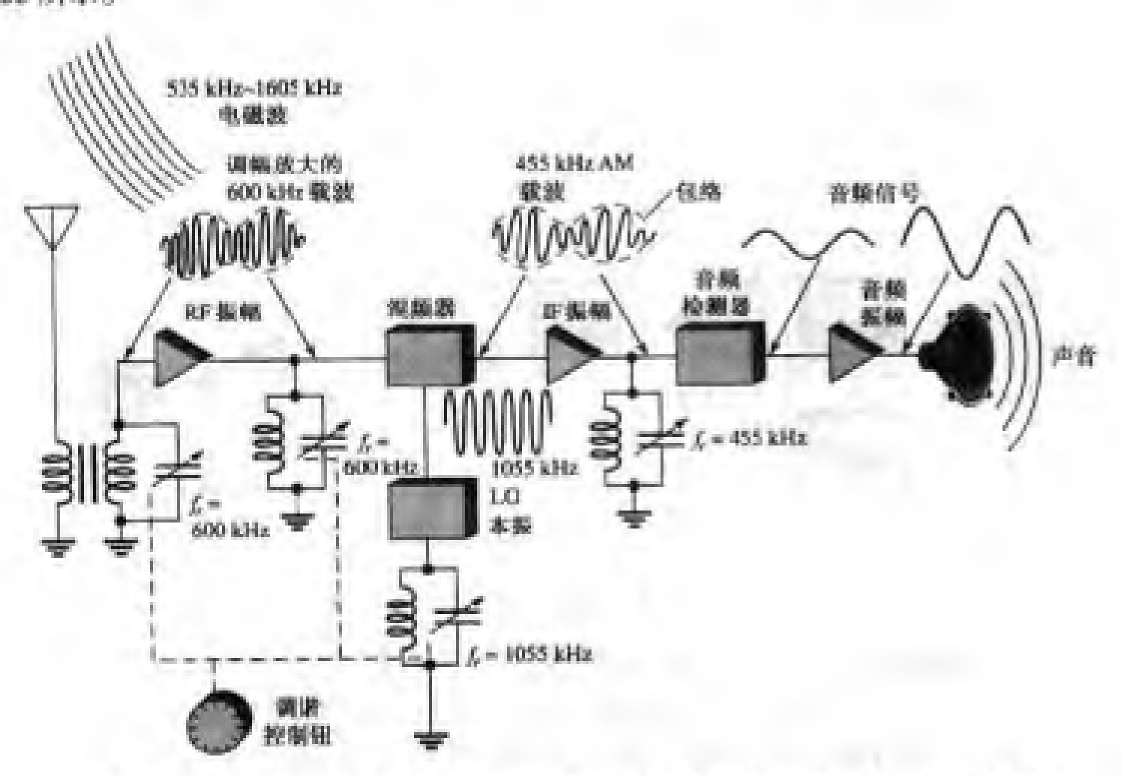


图 18.53　超外差式调幅收音机的简化框图，是可调整的谐振电路应用的一个例子

在这个系统中，在接收机的前端，基本上有三个并联谐振带通滤波器。这些滤波器通过可变电容实现联调。也就是说，这些电容通过电子或者机械的方式连接在一起，当调谐轴转动时可以一起变化。前端用来调谐接收某个站台的信号，比如发送 600 kHz 的站台的信号。在所有

通过天线的频率信号中,输入滤波器和交流频率信号放大器只选择 600 kHz 的信号,通过调制载波的幅度使之跟随音频信号的变化,使得音频信号加在 600 kHz 载波信号上进行传送。反映音频信号的载波幅度的变化叫包络。将 600 kHz 信号加进电路中叫混频。将本振(LO,local oscillator)调至比选择的频率(这里为 1055 kHz)高 455 kHz,通过超外差或差拍,使幅度调制信号和本振信号进行混频,600 kHz 的 AM 信号转变成 455 kHz 调幅信号(1055 kHz - 600 kHz = 455 kHz),该 455 kHz 信号是标准调幅接收机的中频(IF,intermediate frequency)。无论选择什么波段,总能转换成 455 kHz 中频信号。调幅放大的中频信号加在音频检波器上,去掉了中频信号,只留下其包络或音频信号,该音频信号再经过放大,然后加到扬声器上。

18.9 节练习

1. 一般情况下,来自天线的耦合信号加至接收机时,为什么需要一个调谐滤波器?
2. 什么是"陷波?
3. 联调的含义是什么?

技术实践

在第 11 章的技术实践中,已经用接收系统阐明了基本的交流测试方法。在本章中,又要用到这个接收器来说明谐振电路的应用。主要探讨含有谐振电路的接收器的前端,前端通常包括高频放大器、本振和混频器。在这里的技术实践中,高频放大器是重点,现在还不必掌握放大电路的知识。

调幅收音机的基本框图如图 18.54 所示。在这个系统中,"前端"电路的作用是通过频率选择调准所需的电台,然后将所选的频率变为中频。调幅收音机电台传送 535 kHz 到 1605 kHz 范围内的信号。作为这里重点的高频放大器,功能是接收从天线感应的信号,拒绝除所需电台外的所有信号,将所需信号放大到高电平。

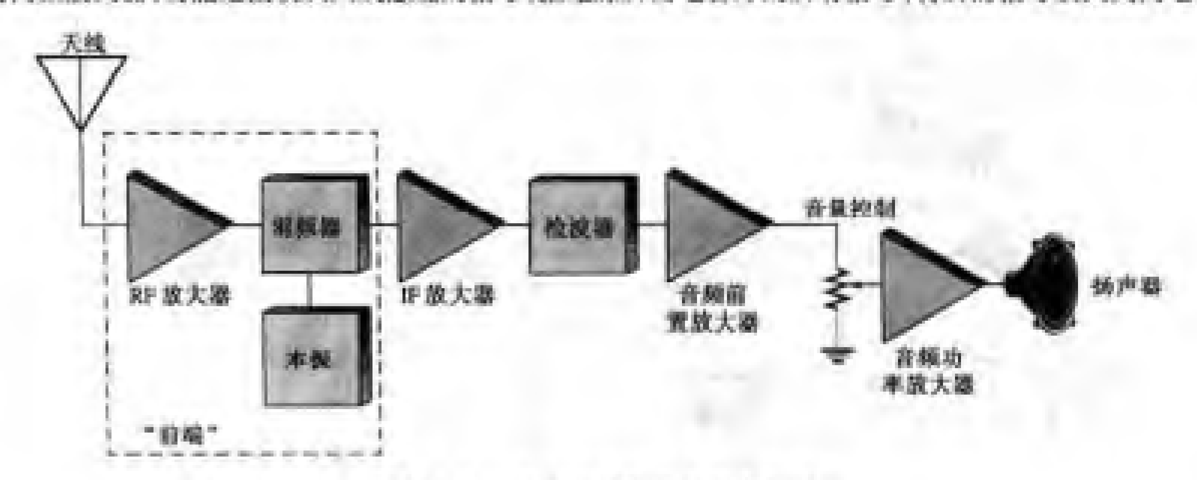


图 18.54 基本交流收音机简化框图

高频放大器的结构如图 18.55 所示。并联谐振调谐电路包括 L、C_1 和 C_2,这种特定的高频放大器输出端并没有谐振电路。C_1 是可变电容,以后将会谈到它是半导体元件。需要知道的是,通过改变加在电容上的直流电压可以改变其电容值。在这个电路里,直流电压取自调谐用的电位器滑动端。

来自电位器的电压可从 +1 V 变到 +9 V。在 +1 V 时可变电容值是 200 pF,在 +9 V 时可变电容是 5 pF。电容 C_2 是补偿用的,用于谐振电路的内部调整。一旦调整好,C_2 的值就固定下来。C_1 和 C_2 是并联的,谐振电路的总电容是 C_1 和 C_2 之和。C_3 对谐振电路的影响最小,可以忽略。C_3 的作用是使直流电压能够加到可变电容器上,同时提供交流地。

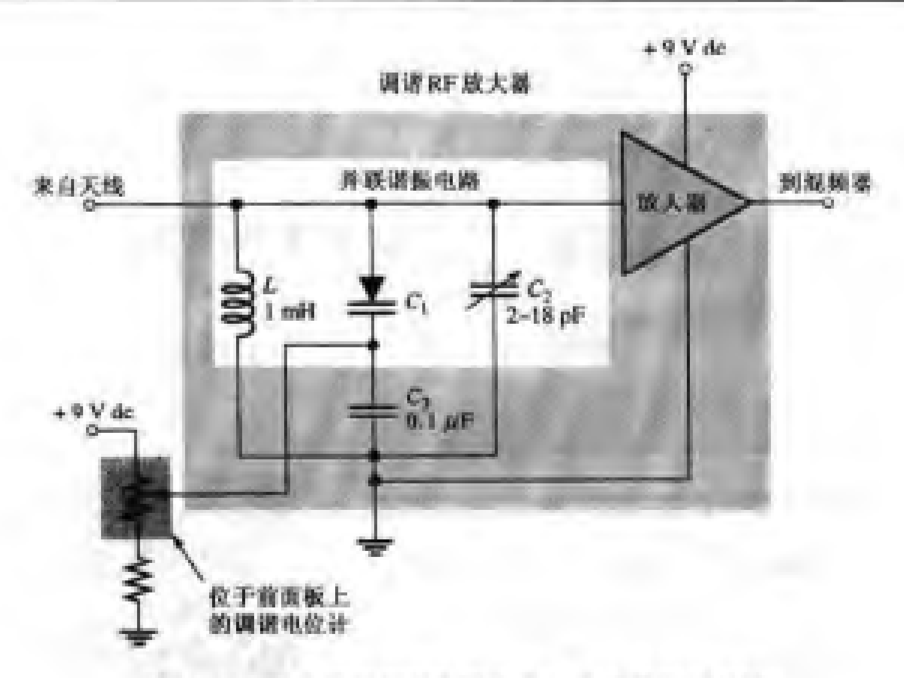


图 18.55 表示谐振调谐电路的高频放大器部分结构

在这里的技术实践中，将使用图 18.56 所示的高频放大器电路板。虽然放大器的所有元件都在电路板上，但要重点关注的是加亮部分所示的谐振电路。

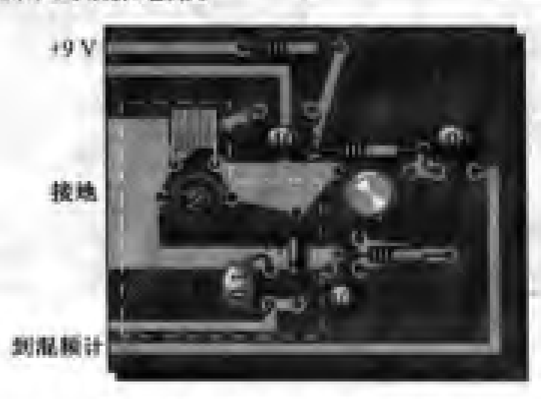


图 18.56 高频放大器电路板

谐振电路中的电容

- 电容 C_2 的确定：C_2 的电容值在一定范围内变化时要覆盖调幅信号的频率范围。C_3 可以忽略。这样，可变电容取最大值时，谐振频率将会小于 535 kHz；可变电容取最小值时，谐振频率将会大于 1605 kHz。
- 运用已算出的 C_2 值分别计算使谐振频率等于 535 kHz 和 1605 kHz 的可变电容的值。

谐振电路的检测

- 设计检测步骤，用图 18.57 所示测试板上的仪器检测谐振电路，将检测板和仪器逐点连起来。
- 应用图 18.58 表示可变电容随外加电压变化的曲线，求出在电源 *B* 组输出不同的直流电压时谐振频率的值。电源的 *B* 输出端用来模拟电位器电压。

技术实践练习

1. 幅度调制接收机的频率范围是什么？
2. 叙述高频放大器的用途。
3. 幅度调制的频带内如何选特定频率？

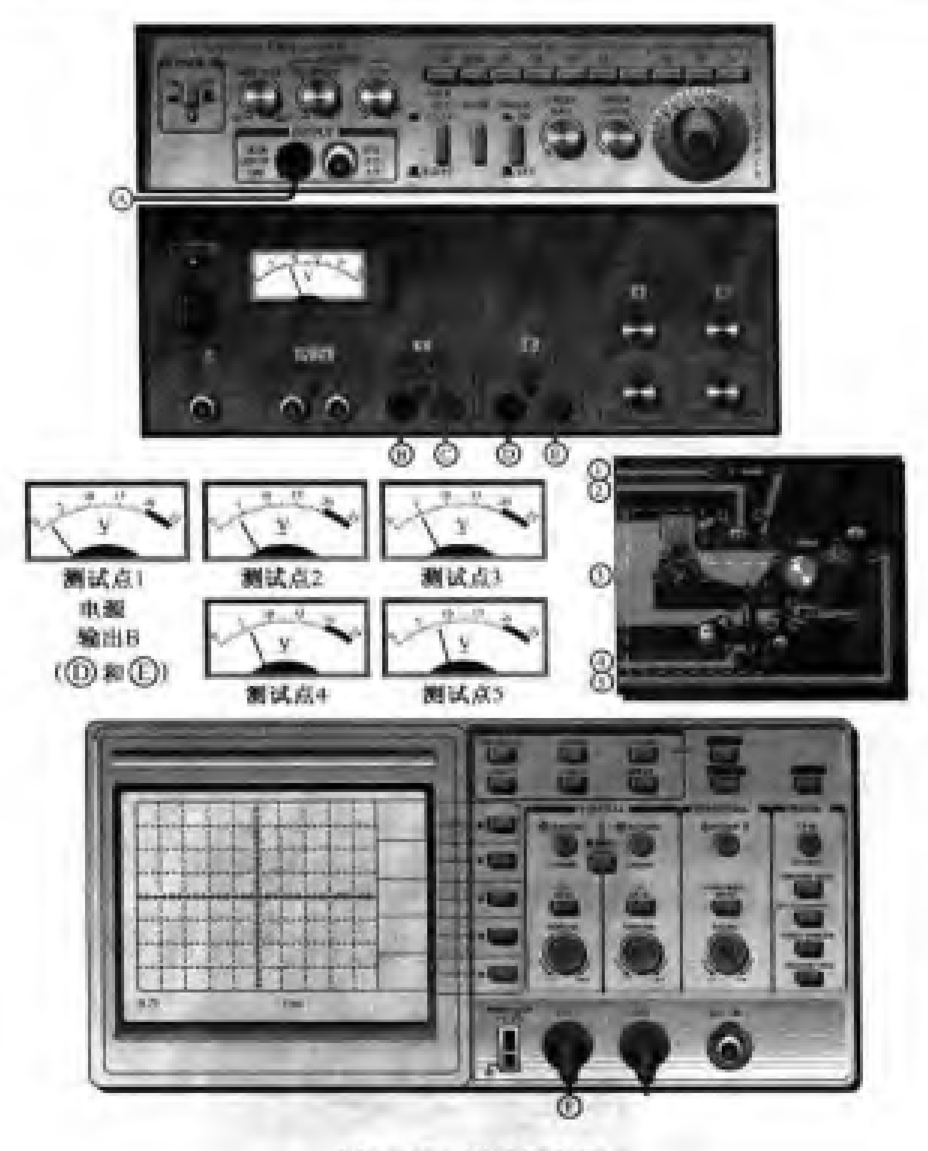


图 18.57 测试板布局

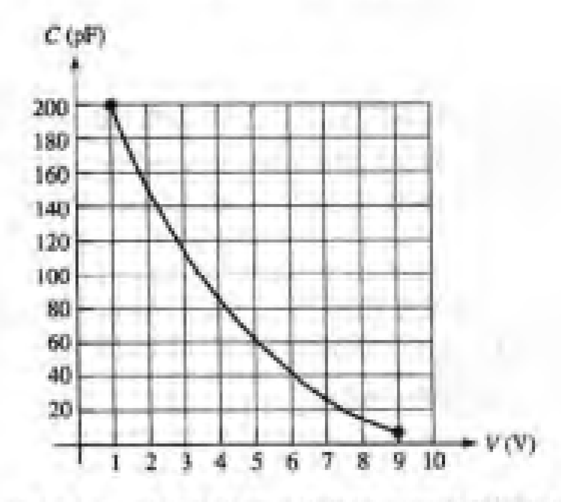


图 18.58 可变电容器电容值随电压变化的曲线

小结

- 在 RLC 电路中 X_C 和 X_L 具有相反的作用。
- 在串联 RLC 电路中，电抗大的元件决定电路总的电抗特性。
- 在串联谐振电路中，容性和感性电抗相等。
- 在谐振点，串联 RLC 电路是纯电阻性的。
- 在串联 RLC 电路中，谐振时电流最大。
- 在串联 RLC 电路中，发生谐振时 V_L 和 V_C 幅度相等，相位相差 180°，所以 V_L 和 V_C 相互抵消。
- 在并联 RLC 电路中，电抗小的元件决定电路总的电抗特性。
- 在并联 RLC 电路中，在谐振点阻抗最大。
- 并联谐振电路通常叫做振荡电路。
- 在谐振点，并联 RLC 电路的阻抗是纯电阻性的。
- 串联谐振电路的带宽是电流大于或等于 $0.707 I_{max}$ 对应的频率范围。
- 并联谐振电路的带宽是阻抗大于或等于 $0.707 Z_{max}$ 对应的频率范围。
- 临界频率是指谐振频率两侧使电路的响应等于 0.707 倍的最大响应时所对应的两个频率。
- Q 越大，带宽越窄。

主要术语

半功率点频率：使滤波器输出功率等于最大输出功率值的 50%（输出电压等于最大输出电压的 70.7%）时对应的频率，又称做临界频率或拐点频率。

并联谐振：在并联 RLC 电路中，电抗相互抵消，阻抗最大的情况。

谐振频率：谐振情况发生时对应的频率，也叫中心频率。

选择性：是对一个滤波器如何有效地使某些频率的信号能够通过而拒绝其他频率信号的一种量度。一般情况下，带宽越窄，选择性越强。

串联谐振：串联 RLC 电路中，电抗相互抵消，阻抗最小的情况。

振荡电路：指并联谐振电路。

公式

串联 RLC 电路

18.1 $X_{tot} = |X_L - X_C|$

18.2 $\mathbf{Z} = R + jX_L - jX_C$

18.3 $\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$

串联谐振

18.4 $X_L = X_C$

18.5 $Z_r = R$

18.6 $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

并联 RLC 电路

18.7 $\mathbf{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R\angle 0^\circ} + \frac{1}{X_L\angle 90^\circ} + \frac{1}{X_C\angle -90^\circ}}$

18.8 $\boldsymbol{G}=\frac{1}{R\angle 0°}=G\angle 0°$

18.9 $\boldsymbol{B}_C=\frac{1}{X_C\angle -90°}=B_C\angle 90°=jB_C$

18.10 $\boldsymbol{B}_L=\frac{1}{X_L\angle 90°}=B_L\angle -90°=-jB_L$

18.11 $\boldsymbol{Y}=\frac{1}{Z\angle \pm\theta}=Y\angle \mp\theta=G+jB_C-jB_L$

18.12 $\boldsymbol{I}_{tot}=\sqrt{I_R^2+(I_C-I_L)^2}\angle \tan^{-1}\left(\frac{I_{CL}}{I_R}\right)$

并联谐振

18.13 $I_{tot}=\frac{V_s}{Z_r}$

18.14 $f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\sqrt{\frac{Q^2}{Q^2+1}}$

18.15 $f_r=\frac{\sqrt{1-(R_W^2C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}}$

18.16 $L_{eq}=L\left(\frac{Q^2+1}{Q^2}\right)$

18.17 $R_{p(eq)}=R_W(Q^2+1)$

18.18 $Z_r=R_W(Q^2+1)$

18.19 $Q_O=\frac{R_{p(tot)}}{X_{L(eq)}}$

18.20 $BW=f_2-f_1$

18.21 $f_r=\frac{f_1+f_2}{2}$

18.22 $BW=\frac{f_r}{Q}$

自测题

1. 串联 RLC 电路中,谐振时总电抗是:
   (a) 0 (b) 等于电阻值 (c) 无穷大 (d) 电容性
2. 串联 RLC 电路谐振时,电源电压与电流的相位差是:
   (a) $-90°$ (b) $+90°$ (c) $0°$ (d) 取决于电抗
3. 串联 RLC 电路中,$L=15$ mH,$C=0.015$ μF,$R_W=80$ Ω,谐振时的阻抗为:
   (a) 15 kΩ (b) 80 Ω (c) 30 Ω (d) 0 Ω
4. 串联 RLC 电路工作频率低于谐振频率时,则电流将:
   (a) 与外加电压同相 (b) 滞后于外加电压 (c) 超前于外加电压
5. 串联 RLC 电路的 C 值增加,则谐振频率将:
   (a) 不受影响 (b) 增加 (c) 保持不变 (d) 减少
6. 在某一串联谐振电路中,$V_C=150$ V,$V_L=150$ V,$V_R=50$ V,则电源电压等于:
   (a) 150 V (b) 300 V (c) 50 V (d) 350 V

7. 某串联谐振电路的带宽是 1 kHz。若将现在的线圈换成一个比原来 Q 值低的线圈，则带宽将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变 (d) 选择性更好
8. 并联 RLC 电路工作频率低于谐振频率时，则电流将：
   (a) 超前于电源电压 (b) 滞后于电源电压 (c) 与电源电压同相
9. 并联 RLC 电路谐振时，流入 L 和 C 支路的总电流理想情况下为：
   (a) 最大 (b) 降低 (c) 提高 (d) 0
10. 将一并联电路谐振频率调到较低频率上，则电容将：
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 不动 (d) 用电感代替
11. 并联电路谐振频率近似等于串联电路谐振频率的条件是：
   (a) Q 很低 (b) Q 很高 (c) 电路中无电阻 (d) 答案(b)或(c)都可以
12. 与并联谐振电路并联的电阻降低时，则带宽将：
   (a) 消失 (b) 减小 (c) 变得更尖锐 (d) 增加

故障检修测验

参见图 18.60

1. 若 R_1 开路，则总电流将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变
2. 若 C_1 开路，则 C_2 两端的电压将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变
3. 若 L_2 开路，则其两端的电压将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变

参见图 18.63

4. 若 L 开路，则 R 上的电压将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变
5. 若 f 调整到电路谐振频率，则 R 上的电流将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变

参见图 18.64

6. 若 L 增加到 100 mH，则谐振频率将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变
7. 若 C 增加到 100 pF，则谐振频率将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变
8. 若 L 开路，则 C 上的电压将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变

参见图 18.66

9. 若 R_2 开路，则 L 上的电压将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变
10. 若 C 短路，则 R_1 上的电压将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变

参见图 18.69

11. 若 L_1 开路，则 a 点到 b 点的电压将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变
12. 若电源频率增加，则 a 点到 b 点的电压将：
   (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变

13. 若电压源频率增加,则 R_1 上的电流将:
 (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变
14. 若电压源频率下降,则 C 上的电压将:
 (a) 增加 (b) 减小 (c) 保持不变

习题(标有 * 的习题难度较大,奇数号习题的答案在本书最后)

第一部分:串联电抗电路

18.1 节 串联 RLC 电路的阻抗

1. 某一串联 RLC 电路的 $R=10\ \Omega$, $C=0.047\ \mu F$, $L=5\ mH$,电源频率是 5 kHz。试求极坐标形式的电路阻抗,总电抗是多少?
2. 求图 18.59 所示电路的阻抗,用极坐标形式表示。

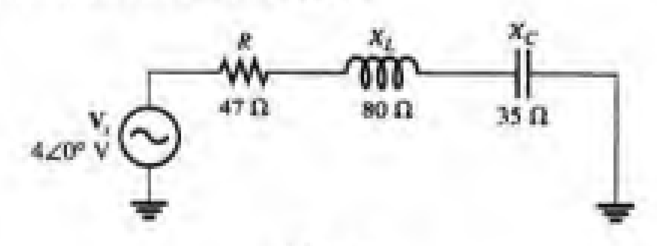


图 18.59

3. 若图 18.59 所示电路中产生该电抗的电压源频率加倍,则阻抗的幅值有何变化?
4. 对于图 18.59 所示的电路,试求使阻抗幅值等于 100 Ω 时的总电抗值。

18.2 节 串联 RLC 电路的分析

5. 对于图 18.59 所示电路,试求极坐标形式的 I_{tot}, V_R, V_L 和 V_C。
6. 对于图 18.59 所示电路,画出电压相量图。
7. 分析图 18.60 所示电路,其 $f=25$ kHz,求:
 (a) I_{tot} (b) P_{true} (c) P_r (d) P_a。

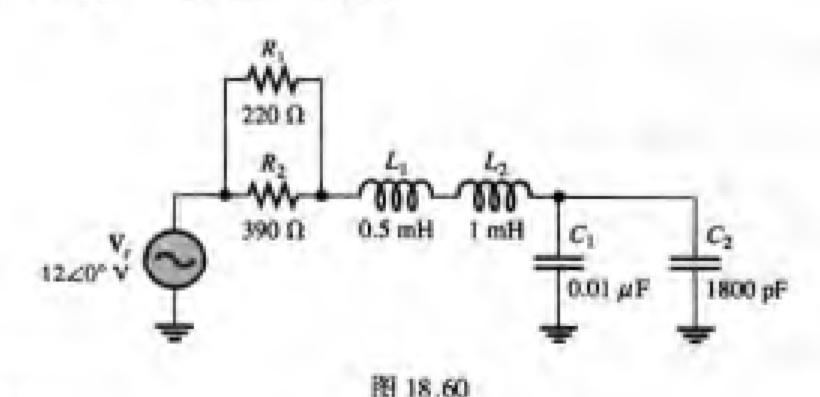


图 18.60

18.3 节 串联谐振

8. 图 18.61 所示电路,在谐振时求 X_L, X_C, Z 和 I。
9. 某串联谐振电路的电流最大值为 50 mA, $V_L=100$ V,电源电压等于 10 V,求 Z, X_L 和 X_C。
10. 对于图 18.62 所示的 RLC 电路,求谐振频率。
11. 图 18.62 电路在两个半功率点处的电流是多少?

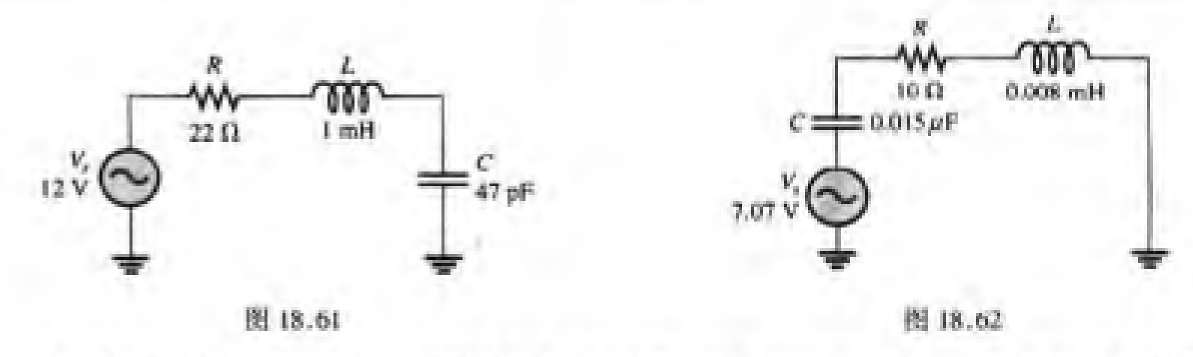


图 18.61　　　　图 18.62

12. 求图 18.62 所示电路在两个临界频率点时，外加电源与电流的相位差是多少？谐振时相位差又是多少？

*13. 设计一个电路，使得该电路具有下面的谐振频率并可用开关进行选择。

(a) 500 kHz　(b) 1000 kHz　(c) 1500 kHz　(d) 2000 kHz

第二部分：并联电抗电路

18.4 节　并联 RLC 电路的阻抗

14. 将图 18.63 所示电路的阻抗表示成极坐标形式。
15. 图 18.63 所示电路是容性的还是感性的？加以说明。
16. 图 18.63 所示电路的电抗性质在哪个频率点会发生改变（由感性变成容性或相反）？

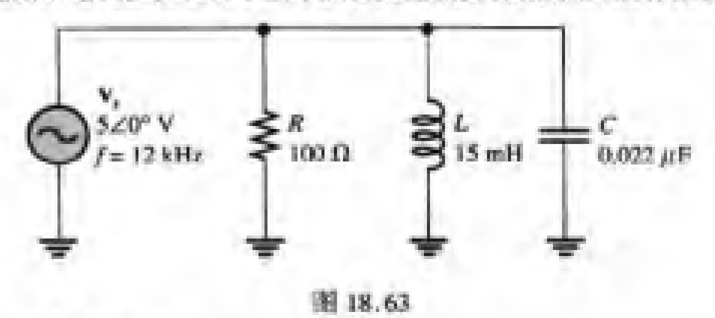


图 18.63

18.5 节　并联 RLC 电路的分析

17. 对于图 18.63 所示的电路，求所有的电压和电流，用极坐标形式表示。
18. 求图 18.63 所示电路频率在 50 kHz 时的总阻抗。
19. 将图 18.63 所示电路的频率改为 100 kHz，再求解第 17 题。

18.6 节　并联谐振

20. 理想并联谐振电路的阻抗是什么（两条支路中，任何一个都不含电阻）？
21. 对图 18.64 所示的振荡电路，求谐振时的阻抗 Z 和 f_r。
22. 图 18.64 所示电路在谐振时电源提供的电流是多少？谐振时，电感上的电流和电容上的电流分别是多少？
23. 求图 18.64 所示电路在谐振时的 P_{true}、P_r 和 P_a。

图 18.64

第三部分：串－并联电抗电路

18.7 节　串－并联 RLC 电路的分析

24. 求图 18.65 中每个电路的总阻抗。
25. 对于图 18.65 中的每个电路，求电源和总电流的相位差。
26. 求图 18.66 所示电路中每个元件上的电压，用极坐标形式表示。
27. 将图 18.66 所示电路转换成其串联等效电路形式。

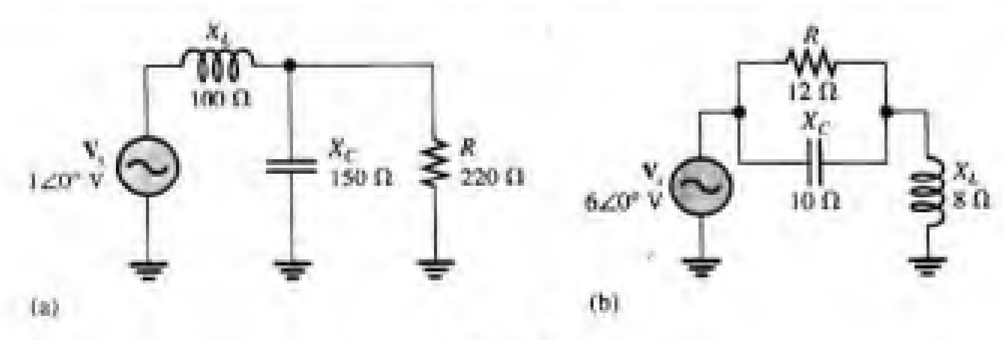


图 18.65

28．图 18.67 所示电路中，R_2 上的电流是多少？

29．图 18.67 所示电路中，I_2 和电源电压的相位差是多少？

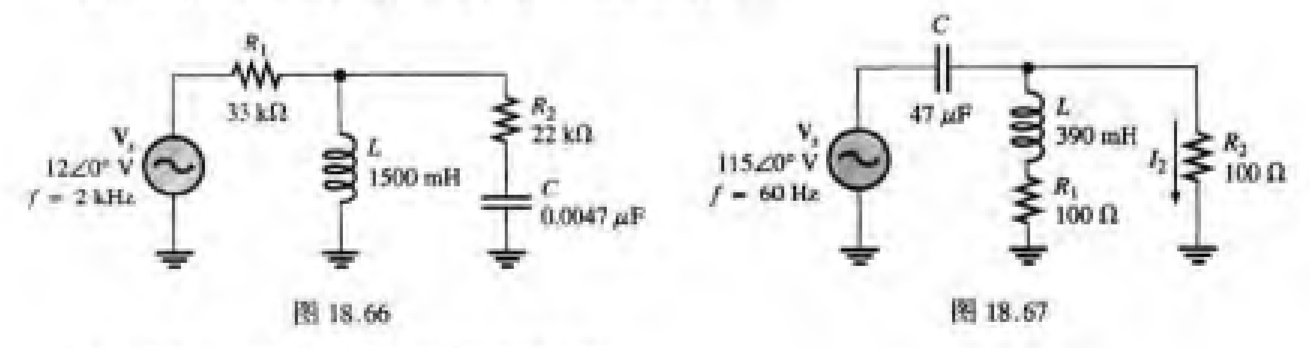


图 18.66　　　　图 18.67

*30．求图 18.68 所示电路的总电阻和总电抗。

*31．求图 18.68 所示电路中每个元件上的电压和电流。

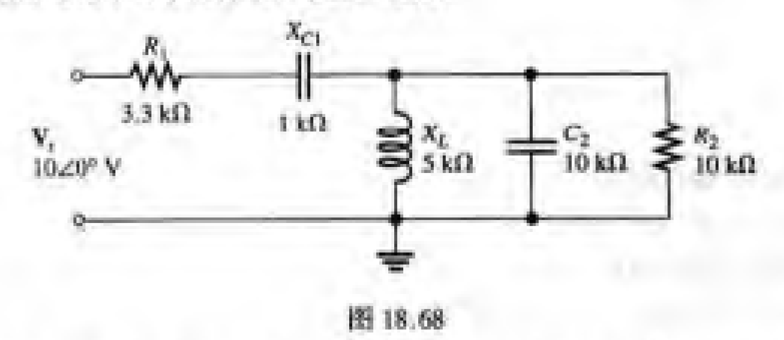


图 18.68

32．对于图 18.69 所示的电路，确定是否存在 C 使 $V_{ab}=0$。若存在则求 C 值；若不存在，请加以解释。

*33．对于图 18.69 所示的电路，若 $C=0.22\ \mu F$，从 a 点到 b 点连一个 100 Ω 的电阻，则该电阻上的电流是多少？

*34．图 18.70 所示的电路有多少谐振频率？为什么？

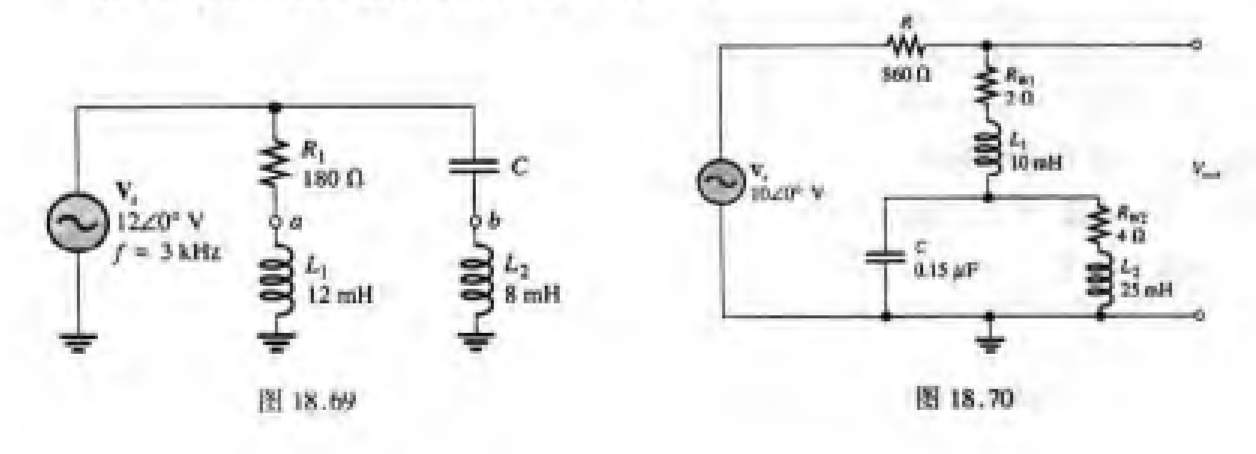


图 18.69　　　　图 18.70

* 35. 求图 18.70 所示电路的谐振频率，并在每个谐振频率上求输出电压。
* 36. 用一个线圈、开关可选择的电容设计并联谐振网络使之具有下列谐振频率：8 MHz，9 MHz，10 MHz，11 MHz，假若线圈的电感是 10 μH，线圈电阻是 5 Ω。

第四部分：专题讨论

18.8 节　谐振电路的带宽

37. 在一并联 *RLC* 电路中，谐振时 $X_L = 2\ \mathrm{k}\Omega$，$R_W = 25\ \Omega$，谐振频率是 5 kHz，求带宽。
38. 若电路的下临界频率是 2400 Hz，上临界频率是 2800 Hz，则带宽是多少？谐振频率是多少？
39. 某一 *RLC* 电路，在谐振时功率是 2.75 W，则在下临界频率处的功率是多少？
* 40. 在振荡电路中，为得到 8 kHz 的谐振频率，800 Hz 的带宽，则 L 和 C 的值分别是多少？已知线圈电阻是 10 Ω。
41. 并联谐振电路的 $Q = 50$，带宽 $BW = 400$ Hz。若 Q 加倍，则对于同样的 f_r，带宽是多少？

EWB/Multisim 故障检修

这些问题需要使用本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

42. 打开文件 P18.42，确定是否有错。若有，请指出。
43. 打开文件 P18.43，确定是否有错。若有，请指出。
44. 打开文件 P18.44，确定是否有错。若有，请指出。
45. 打开文件 P18.45，确定是否有错。若有，请指出。
46. 打开文件 P18.46，确定是否有错。若有，请指出。
47. 打开文件 P18.47，确定是否有错。若有，请指出。
48. 打开文件 P18.48，求电路的谐振频率。
49. 打开文件 P18.49，求电路的谐振频率。

答案

18.1 节　串联 *RLC* 电路的阻抗

1. $X_{tot} = 70\ \Omega$；容性
2. $\mathbf{Z} = 84.3\angle -56.1°\ \Omega$；$Z = 84.3\ \Omega$；$\theta = -56.1°$；电流超前于 V_s。

18.2 节　串联 *RLC* 电路的分析

1. $\mathbf{V}_r = 38.4\angle -21.3°$ V
2. 电流超前于电压。
3. $X_{tot} = 6\ \Omega$

18.3 节　串联谐振

1. 对于串联谐振，$X_C = X_L$。
2. 由于阻抗最小，所以电流最大。
3. $f_r = 159$ kHz
4. 电路是容性的。

18.4 节　并联 *RLC* 电路的阻抗

1. 电路是容性的。
2. $\mathbf{Y} = 1.54\angle 49.4°$ mS
3. $\mathbf{Z} = 651\angle -49.4°\ \Omega$

18.5节 并联 RLC 电路的分析

1. $I_R = 80$ mA, $I_C = 120$ mA, $I_L = 240$ mA
2. 电路是容性的。

18.6节 并联谐振

1. 并联谐振时阻抗最大。
2. 电流最小。
3. $X_C = 1500\ \Omega$
4. $f_r = 225$ kHz
5. $f_r = 22.5$ kHz
6. $f_r = 20.9$ kHz

18.7节 串-并联 RLC 电路的分析

1. $R_{p(eq)} = 1300\ \Omega$, $L_{eq} = 10.16\ \mu$H, $C = 0.22\ \mu$F
2. $L_{(eq)} = 20.1$ mH, $R_{p,eq)} = 1.59$ kΩ

18.8节 谐振电路的带宽

1. $B_W = f_2 - f_1 = 400$ kHz
2. $f_r = 2$ MHz
3. $P_{f2} = 0.9$ W
4. Q 越大意味着 BW 越窄。

18.9节 谐振的应用

1. 调谐滤波器用来选择窄的带宽。
2. 陷波是指带阻滤波器。
3. 联调是通过一公共控制系统实现几个电容(或电感)的同步来进行调整的。

技术实践

1. 幅度调制的频率范围是 535 kHz 到 1605 kHz。
2. 高频放大器拒绝除了选择电台信号以外的其他所有信号,然后对选择的信号进行放大。
3. 特定 AM 频率的选择是通过调整可变电容两端的电压而改变电容值来实现的。

实例相关练习

18.1 $\mathbf{Z} = 12.7\angle 82.3°$ kΩ

18.2 $\mathbf{Z} = 4.72\angle 45.6°$ kΩ,见图 18.71。

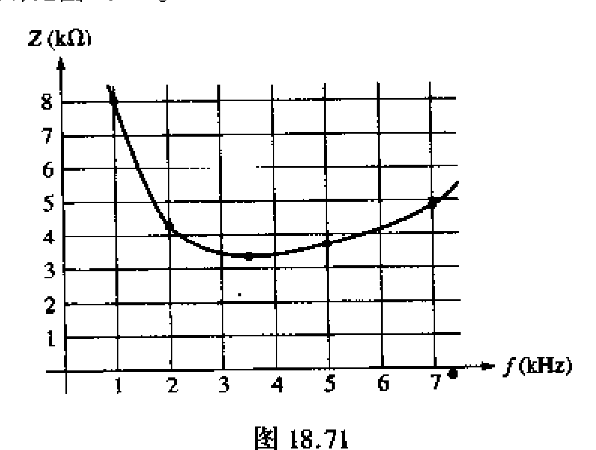


图 18.71

18.3　电流随频率增加而增加到某一个值后，开始下降。

18.4　电路是电容性的。

18.5　$f_r = 22.5\ \text{kHz}$

18.6　Z 增加，Z 增加。

18.7　$I = 22.7\ \text{mA}$

18.8　Z 减小。

18.9　感性。

18.10　I_{tot} 增加。

18.11　更大。

18.12　$V_C = 9.30\angle -65.8°\ \text{V}$

18.13　$V_{C1} = 27.1\angle -81.1°\ \text{V}$

18.14　$R_{p(eq)} = 25\ \text{k}\Omega, L_{eq} = 5\ \text{mH}, C = 0.022\ \mu\text{F}$

18.15　$Z_r = 79.9\ \text{k}\Omega$

18.16　$I = 35.4\ \text{mA}$

18.17　$f_1 = 6.75\ \text{kHz}; f_2 = 9.25\ \text{kHz}$

18.18　$BW = 7.96\ \text{kHz}$

自测题

1.(a)　2.(c)　3.(b)　4.(c)　5.(d)　6.(c)　7.(a)
8.(b)　9.(d)　10.(a)　11.(b)　12.(d)

习题

1.(b)　2.(a)　3.(a)　4.(c)　5.(c)　6.(b)　7.(b)　8.(c)
9.(a)　10.(a)　11.(a)　12.(a)　13.(b)　14.(a)

第 19 章　基本滤波器

引言

滤波器的概念是在第 16 章、第 17 章和第 18 章介绍的,用以阐述 *RC*, *RL* 和 *RLC* 电路的应用。本章主要是前面内容的扩展,提供了与滤波器相关的其他内容。

本章讨论的无源滤波器,是由电阻、电容和电感按各种各样的方式组成的。在以后的课程中,将学习由无源元件以及放大器组成的有源滤波器。前几章我们已经看到了基本的 *RC*, *RL* 和 *RLC* 电路可以用做滤波器。在本章将介绍无源滤波器可以用在按其响应特性分类的 4 种主要的场合:低通、高通、带通和带阻。在这些范畴中,将研究几种常见的类型。

本章目标

- 分析 *RC* 和 *RL* 低通滤波器的工作过程
- 分析 *RC* 和 *RL* 高通滤波器的工作过程
- 分析带通滤波器的工作过程
- 分析带阻滤波器的工作过程

主要术语

- 低通滤波器
- 通带
- 临界频率(f_c)
- 拐点
- 衰减
- 十倍频程
- 波特图
- 高通滤波器
- 带通滤波器
- 中心频率(f_0)
- 带阻滤波器

技术实践

在技术实践中,将通过示波器测量画出滤波器的频率响应,并识别滤波器的类型。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料,请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

19.1　低通滤波器

低通滤波器允许输入信号中较低频率的分量通过,而阻止较高频率的分量。

在学完这一节后,读者应该能够:

- 分析 *RC* 和 *RL* 低通滤波器的工作过程
- 以分贝为单位表述输入/输出电压比和功率比
- 求低通滤波器的临界频率
- 解释实际和理想低通滤波器响应曲线的区别
- 定义拐点

- 画出一个低通滤波器的波特图
- 讨论低通滤波器的相移

图 19.1 显示了低通滤波器的方框图和一般响应曲线。能够通过低通滤波器的信号的特定低频范围称为低通滤波器的通带。通带上限的这一点称为临界频率 f_c，如图 19.1(b)所示。临界频率是滤波器输出电压值为最大值的 70.7%时对应的频率。滤波器的临界频率也称为截止频率、拐点频率或者 -3 dB 频率，因为在这一频率点上输出电压比其最大值低 3 dB。滤波器的度量常用到分贝 dB(decibel)这个单位，应该理解这个术语。

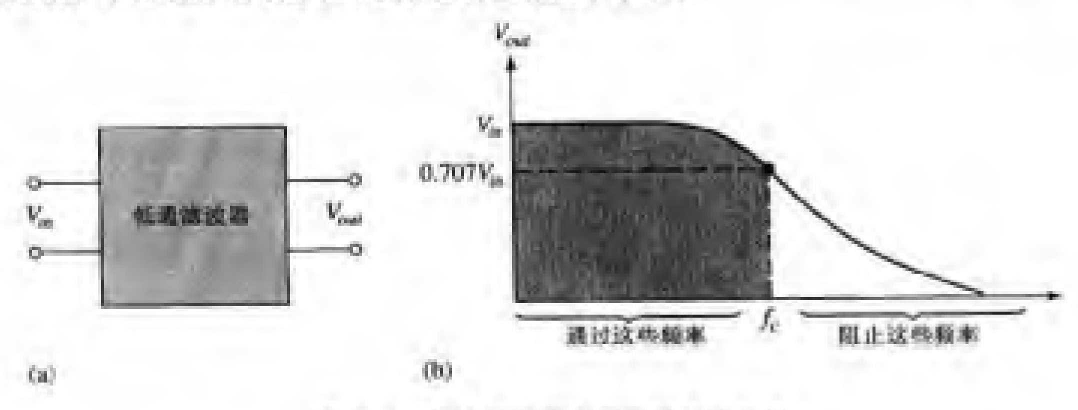


图 19.1　低通滤波器方框图及响应曲线

19.1.1　分贝

分贝单位来源于人耳对声音强度对数的反应。分贝是功率与另一功率或是电压与另一电压比值的对数量度，可以用于描述滤波器的输入/输出关系。以下方程描述了功率之比的分贝形式：

$$dB = 10\log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \tag{19.1}$$

由对数的性质可以得到以下电压之比的分贝公式。只有当两个电压加在相同的阻抗时这个公式才是正确的。

$$dB = 20\log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \tag{19.2}$$

例 19.1　在某一频率上，滤波器的输出电压为 5 V，输入电压为 10 V。请给出分贝形式的电压之比。

解：

$$20\log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = 20\log\left(\frac{5\text{ V}}{10\text{ V}}\right) = 20\log(0.5) = \mathbf{-6.02\ dB}$$

练习：给出比值 $V_{out}/V_{in} = 0.85$ 的分贝形式。

19.1.2　*RC* 低通滤波器

基本的 *RC* 低通滤波器如图 19.2 所示。注意输出电压取自电容的两端。

当输入是直流(0 Hz)时，输出电压等于输入电压，因为 X_C 无限大。当输入频率增加时，X_C 减小，也导致 V_{out} 逐渐减小，直到 $X_C = R$。此时的频率为滤波器的特征频率 f_c。

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_c C} = R$$

V_{in}　R 100 Ω　V_{out}　C 0.0047 μF

图 19.2

解出 f_c,得:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{19.3}$$

在任何频率下,应用分压公式可得输出电压大小为:

$$V_{out} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in}$$

因为在 $f = f_c$ 时,$X_C = R$,特征频率下的输出电压用分压公式可以表述为:

$$V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + R^2}}\right)V_{in} = \left(\frac{R}{\sqrt{2R^2}}\right)V_{in} = \left(\frac{R}{R\sqrt{2}}\right)V_{in} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)V_{in} = 0.707V_{in}$$

这些计算说明当 $X_C = R$ 时,输出为输入的70.7%。按照定义,此时的频率称为特征频率。

在特征频率时输出电压同输入电压比率的分贝形式如下:

$$V_{out} = 0.707V_{in}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 0.707$$

$$20\log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = 20\log(0.707) = -3\text{ dB}$$

例 19.2 求图 19.2 所示低通滤波器的特征频率。

解:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(100\ \Omega)(0.0047\ \mu\text{F})} = \mathbf{339\ kHz}$$

在该频率下,输出电压比输入电压低 3 dB(V_{out} 的最大值等于 V_{in})。

练习:某一 RC 低通滤波器,$R = 1.0\ \text{k}\Omega$,$C = 0.022\ \mu\text{F}$,求特征频率。

19.1.3 响应曲线的"拐点"

图 19.3 中,弧线表示低通滤波器的实际响应曲线。输出的最大值作为参考定为 0 dB。0 分贝对应着 $V_{out} = V_{in}$,因为 $20\log(V_{out}/V_{in}) = 20\log 1 = 0$ dB。输出值由 0 dB 降到特征频率时的 −3 dB,而后以一固定速率继续下降。这种形式的减小称为频率响应的拐点。折线表示理想的输出响应,这时认为输出在特征频率前是平直的,然后以固定的速率减小。

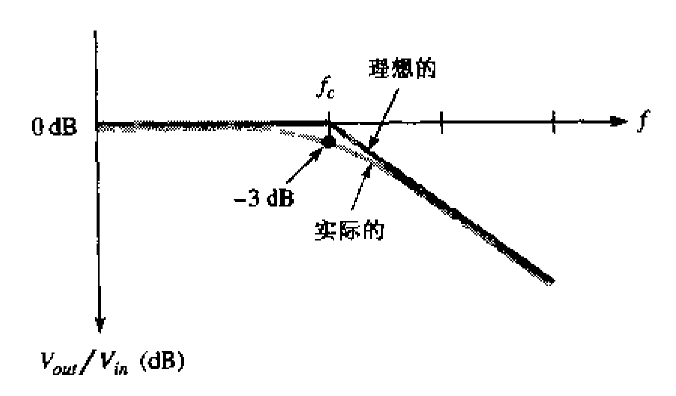


图 19.3 低通滤波器的实际和理想响应曲线

可以看出，频率增加到特征频率 f_c 时，低通滤波器的输出电压减小了 3 dB。频率继续增加到 f_c 以上时，输出电压继续减小。事实上，频率大于 f_c 以后每变化十倍，输出就会减少 20 dB，如以下步骤所示。

令频率为特征频率的十倍（$f = 10f_c$）。因为在 $f = f_c$ 时 $R = X_c$，由 X_C 和 f 的反比关系，有 $f = 10f_c$ 时，$R = 10X_C$。

RC 电路的衰减为比例 V_{out}/V_{in}，展开如下：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{X_C}{\sqrt{(10X_C)^2 + X_C^2}}$$

$$= \frac{X_C}{\sqrt{100X_C^2 + X_C^2}} = \frac{X_C}{\sqrt{X_C^2(100 + 1)}} = \frac{X_C}{X_C\sqrt{101}} = \frac{1}{\sqrt{101}} \cong \frac{1}{10} = 0.1$$

分贝衰减为：

$$20\log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = 20\log(0.1) = -20\text{ dB}$$

频率变化十倍称为十倍频程。所以对于 RC 电路，输出电压每十倍频程减小 20 dB，高通电路中也可得到相似的结果。对于基本 RC 和 RL 滤波器，拐点变化速率为一常量：-20 dB/十倍频程。图 19.4 表示半对数坐标上的理想频率响应，横轴上每一间隔为频率的十倍，这种响应曲线称为波特图。

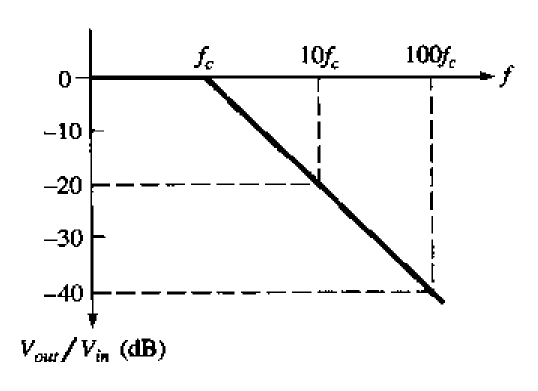


图 19.4　低通 RC 滤波器的频率拐点（波特图）

例 19.3　为图 19.5 所示滤波器绘制三个十倍频程的波特图。用半对数坐标纸。

解：该低通滤波器的特征频率为：

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(1.0\text{ k}\Omega)(0.0047\ \mu\text{F})} = 33.9\text{ kHz}$$

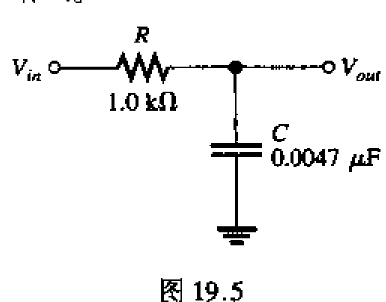


图 19.5

理想波特图如图 19.6 的半对数图中的折线所示，近似的实际响应曲线用弧线表示。首先请注意，横坐标轴是对数刻度，而纵轴为线性刻度。频率在对数坐标上，分贝表示的滤波器输出在线性坐标上。

频率小于 f_c（33.9 kHz）时，输出是平坦的。随着频率增加到 f_c 以上，输出便以 -20 dB/十倍频程的速率下降。因此，对于理想曲线，频率每增加十倍，输出就减少20 dB。在实际中，曲线同这种情况稍有不同，在特征频率时，输出为 -3 dB 而不是 0 dB。

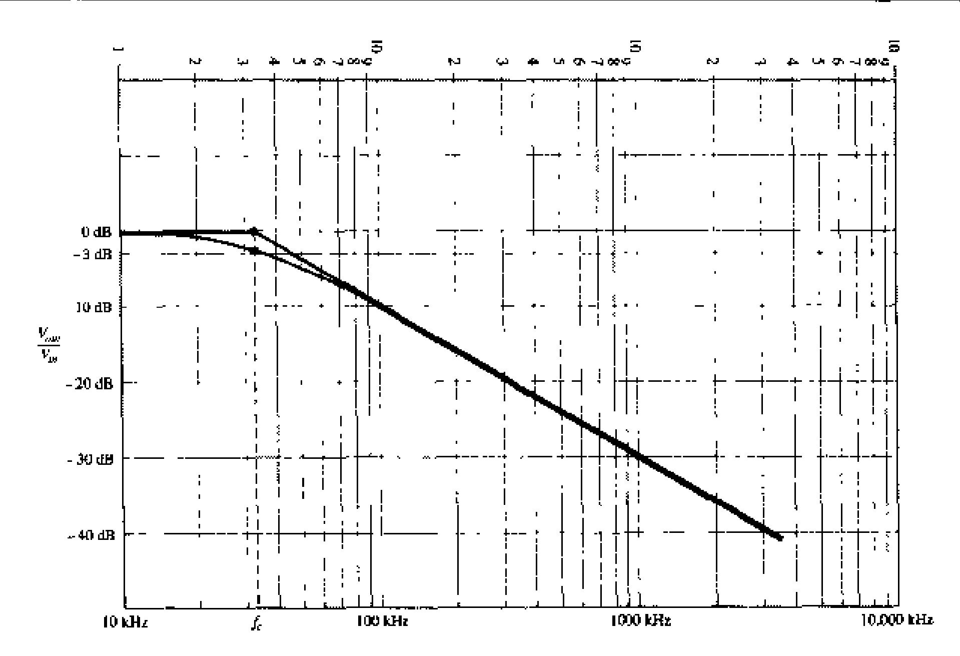


图 19.6　图 19.5 所示电路的波特图。折线代表理想响应曲线,弧线代表实际响应曲线

练习:在图 19.5 所示电路中,若电容 C 减至 0.001 μF,特征频率和拐点变化速率将有什么变化?

19.1.4　*RL* 低通滤波器

基本的 *RL* 低通滤波器如图 19.7 所示。注意,输出电压取自电阻两端。

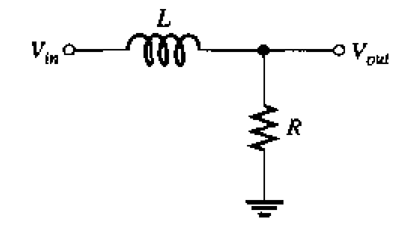


图 19.7　*RL* 低通滤波器

当输入是直流(0 Hz)时,因为 X_L 是很小的(如果 R_W 可忽略),所以输出电压理想情况下等于输入电压。输入信号频率增加时,X_L 也同样增加,所以 V_{out} 逐渐减小直至达到特征频率。在该频率点上,$X_L = R$,特征频率 f_c 等于:

$$2\pi f_c L = R$$

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \tag{19.4}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi(L/R)}$$

正如在 *RC* 低通滤波器中一样,对于 *RL* 低通滤波器,在特征频率时 $V_{out} = 0.707V_{in}$,输出电压比输入电压低 3 dB。

例 19.4　为图 19.8 所示的滤波器绘制三个十倍频程的波特图。用半对数坐标纸。

解:低通滤波器的特征频率为:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(L/R)} = \frac{1}{2\pi(4.7\ \text{mH}/2.2\ \text{k}\Omega)} = 74.5\ \text{kHz}$$

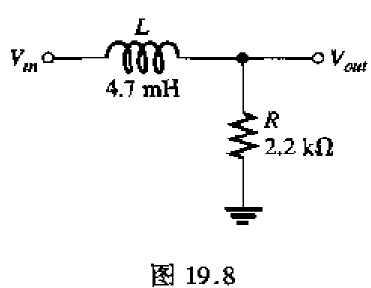


图 19.8

理想波特图在图 19.9 所示半对数图形中用折线表示,近似的实际响应曲线用弧线表示。首先请注意横坐标轴是对数刻度,而纵坐标是线性刻度。频率标注于对数坐标上,分贝形式的滤波器输出标注于线性坐标上。

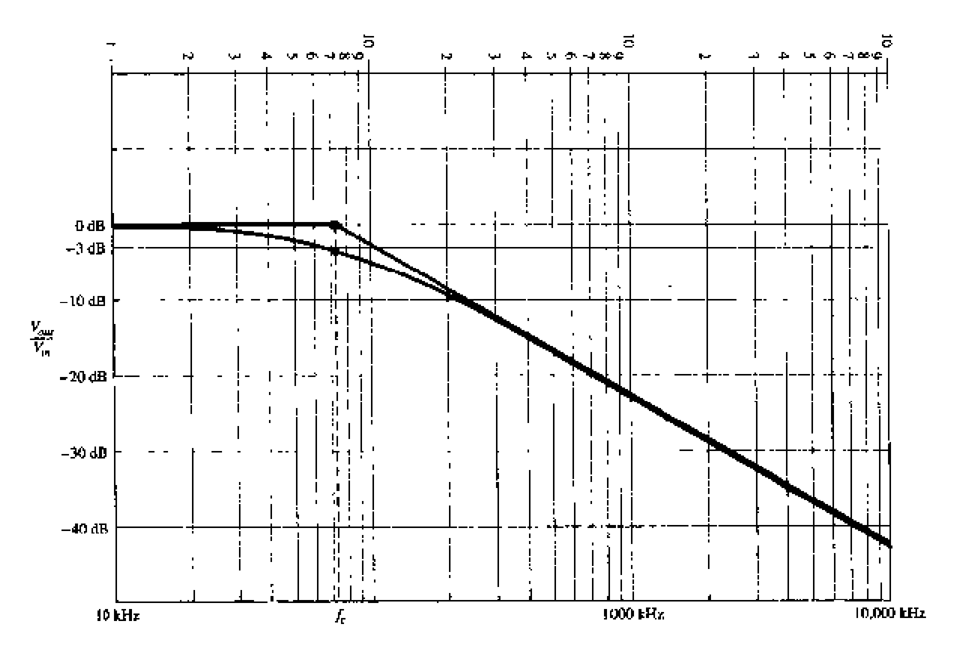


图 19.9　图 19.8 所示电路的波特图。折线为理想响应曲线，弧线为实际响应曲线

输出在频率小于 f_c(74.5 kHz)时是平坦的。当频率增大到 f_c 以上时，输出便以 -20 dB/十倍频程的速率减小。因而对于理想曲线，每当频率增加十倍，输出就会减小 20 dB。实际情况与此稍有不同，在特征频率时，实际输出为 -3 dB 而不是 0 dB。

练习：在图 19.8 中，当 L 减小到 1 mH 时，特征频率和拐点变化速率将有什么变化？

19.1.5　低通滤波器的相移

RC 低通滤波器起着相位滞后的作用。回忆第 16 章，输入到输出的相移可表示为：

$$\phi = -90° + \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

在特征频率时，$X_C = R$，所以 $\phi = -45°$。输入频率减小时，ϕ 也减小，并且频率接近零时 ϕ 也接近 0°。图 19.10 说明了这种相频响应特征。

RL 低通滤波器也充当了滞后网络的角色。回忆第 17 章，相移可表达为：

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

正如在 *RC* 滤波器中一样，在特征频率时，从输入到输出的相移为 -45°，且在频率小于 f_c 时相移减小。

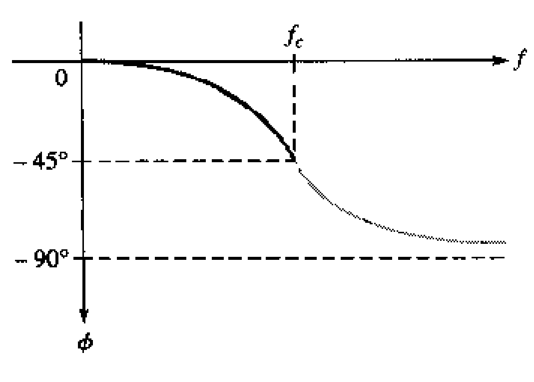


图 19.10　低通滤波器的相频响应特征

19.1 节练习

1. 在某低通滤波器中，$f_c = 2.5$ kHz，其通带是多少？
2. 在某一低通滤波器中，频率为 f_1 时，$R = 100\ \Omega$，$X_C = 2\ \Omega$。求在此频率下当 $V_{in} = 5\angle 0°$ V rms 时的 V_{out}。
3. $V_{out} = 400$ mV，$V_{in} = 1.2$ V，给出 V_{out}/V_{in} 的 dB 形式。

19.2 高通滤波器

高通滤波器允许输入信号中较高频率的成分通过，同时阻止较低频率的信号。

在学习完这一节后，读者应该能够：

- 分析 *RC* 和 *RL* 高通滤波器的工作过程
- 求高通滤波器的特征频率
- 解释实际和理想响应曲线的区别
- 绘制高通滤波器波特图
- 讨论高通滤波器中的相移

图 19.11 显示了高通滤波器的方框图及一般的响应曲线。通带的低端称为特征频率。正如在低通滤波器中一样，在此特征频率处，输出值为最大值的 70.7%，如图中所示。

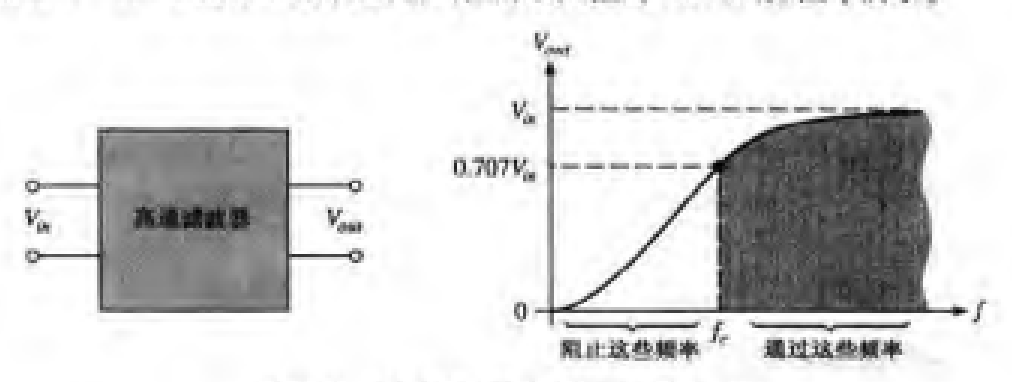


图 19.11 高通滤波器的方框图及响应曲线

19.2.1 *RC* 高通滤波器

基本的 *RC* 高通滤波器如图 19.12 所示。注意，输出电压取自电阻的两端。

输入信号频率为特征频率时 $X_C = R$，而输出电压为 $0.707V_{in}$，如低通滤波器的情况一样。输入信号频率增加到特征频率以上时 X_C 减小，所以输出电压增加并且接近 V_{in}。高通滤波器特征频率的表达式和低通滤波器一样。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

频率小于 f_c 时，输出电压以 -20 dB/十倍频程的速率下降(拐点)。图 19.13 给出了高通滤波器的实际及理想响应曲线。

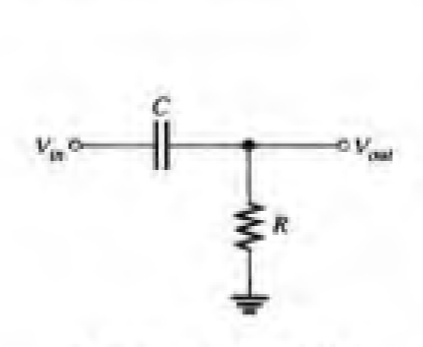


图 19.12 *RC* 高通滤波器

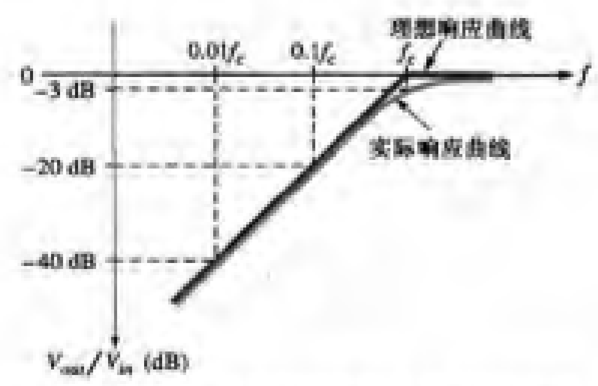


图 19.13 高通滤波器的实际及理想响应曲线

例 19.5　为图 19.14 电路中的滤波器绘制三个十倍频程的波特图(用半对数坐标纸)。

解:此高通滤波器的特征频率是:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(330\ \Omega)(0.047\ \mu\text{F})} = 10.3\ \text{kHz} \cong 10\ \text{kHz}$$

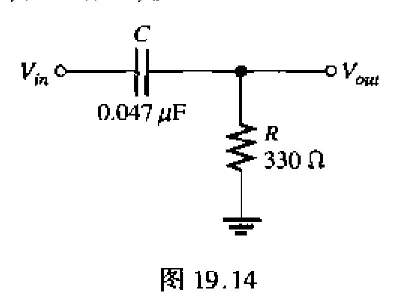


图 19.14

理想波特图在图 19.15 的半对数坐标图中用折线表示,近似的实际响应曲线用弧线表示。首先请注意,横坐标是对数的,而纵坐标是线性的。频率表示在对数坐标中,滤波器输出用分贝形式在线性坐标中表示。

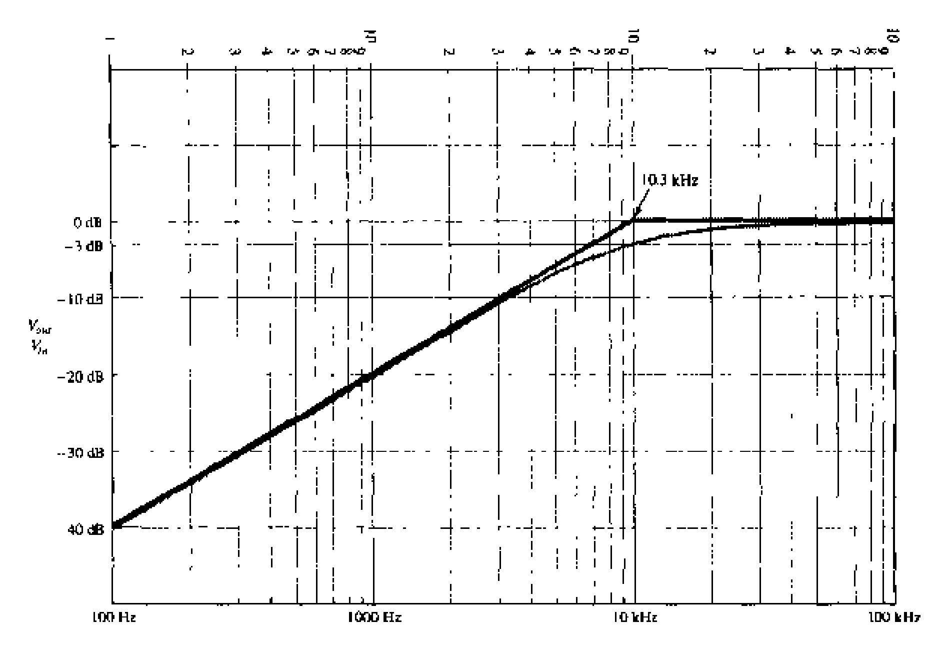


图 19.15　图 19.14 电路的波特图。折线为理想响应曲线,弧线为实际响应曲线

输出在频率大于 f_c(约为 10 kHz)时是平坦的。频率减小到 f_c 以下时,输出以 −20 dB/十倍频程的速率下降。所以对于理想曲线,频率每减小十倍,输出就减小 20 dB。在实际中情况略有不同,在特征频率时,输出实际为 −3 dB 而不是 0 dB。

练习:如果此高通滤波器输入信号的频率减小为 10 Hz,输出/输入的分贝值是多少?

19.2.2　*RL* 高通滤波器

基本的 *RL* 高通滤波器如图 19.16 所示。注意输出取自电感两端。

输入信号频率等于特征频率时 $X_L = R$,输出电压等于 $0.707V_{in}$。频率增大到超过 f_c 时,X_L 也增大,其结果是输出电压也增大,直到等于 V_{in}。高通滤波器特征频率的表达式同低通滤波器是一样的。

$$f_c = \frac{1}{2\pi(L/R)}$$

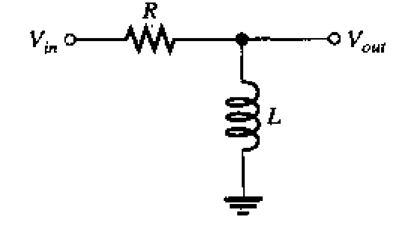


图 19.16　*RL* 高通滤波器

19.2.3　高通滤波器的相移

无论是 *RC* 还是 *RL*,高通滤波器都扮演着超前网络的角色。回忆第 16 章和第 17 章,*RC* 超前网络从输入到输出的相移是:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

RL 超前网络的相移是：

$$\phi = 90° - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

在特征频率时，$X_L = R$，$\phi = 45°$。频率增加时，ϕ逐渐减小并趋向 0°，如图 19.17 所示。

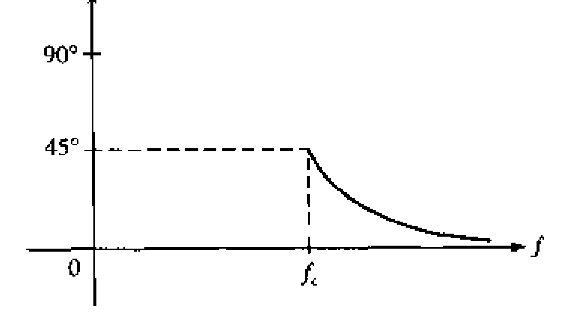


图 19.17 高通滤波器的相频响应特性



例 19.6 (a) 在图 19.18 中，找出 C 的值，使得输入信号频率是 10 kHz 时，X_C 为 R 的十分之一。

(b) 直流分量为 10 V 的 5 V 正弦波作为输入，求输出电压的幅值和相移。

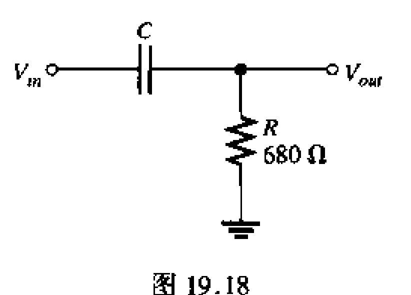


图 19.18

解：(a) C 的值由以下步骤确定：

$$X_C = 0.1R = 0.1(680\ \Omega) = 68\ \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi(10\ \text{kHz})(68\ \Omega)} = \mathbf{0.234\ \mu F}$$

最接近的标准值是 $C = 0.22\ \mu\text{F}$。

(b) 正弦输出电压的幅值由以下步骤确定：

$$V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in} = \left(\frac{680\ \Omega}{\sqrt{(680\ \Omega)^2 + (68\ \Omega)^2}}\right)5\ \text{V} = \mathbf{4.98\ V}$$

相移是：

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{68\ \Omega}{680\ \Omega}\right) = \mathbf{5.7°}$$

在 $f = 10$ kHz，也就是特征频率的十倍频程时，正弦输出的幅值几乎与输入相等，相移也很小。而 10 V 的直流分量却被滤除，在输出中消失。

练习：如果 R 变为 220 Ω，重复例题中的(a)和(b)两部分。

19.2 节练习

1. 高通滤波器的输入电压是 1 V，在特征频率时，V_{out}是多少？
2. 在某一高通滤波器中，$V_{in} = 10\angle 0°$ V，$R = 1.0$ kΩ，$X_L = 15$ kΩ，求 V_{out}。

19.3 带通滤波器

带通滤波器允许特定频率范围的信号通过，而削弱或阻止所有低于或高于此频段的信号。在学完本节后，读者应该能够：

- 分析带通滤波器的工作原理
- 定义带宽
- 描述如何用低通和高通滤波器实现带通滤波器
- 解释串联谐振带通滤波器
- 解释并联谐振带通滤波器
- 计算带通滤波器的带宽和输出电压

带通滤波器的带宽是一段频率范围，在此范围内电流以及电压等于或大于谐振频率时其值的 70.7%。

我们知道，带宽经常简写为 BW。

图 19.19 显示了典型带通滤波器的响应曲线。

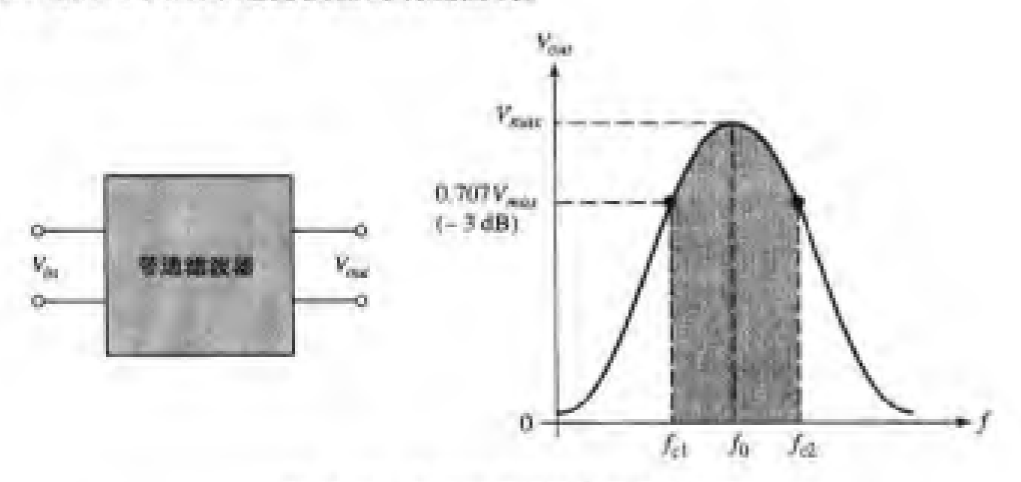


图 19.19　典型带通滤波器的响应曲线

19.3.1　低通/高通滤波器

一个低通滤波器和一个高通滤波器的组合可以构成一个带通滤波器，如图 19.20 所示。必须考虑第二个滤波器对第一个滤波器产生的负载效应。

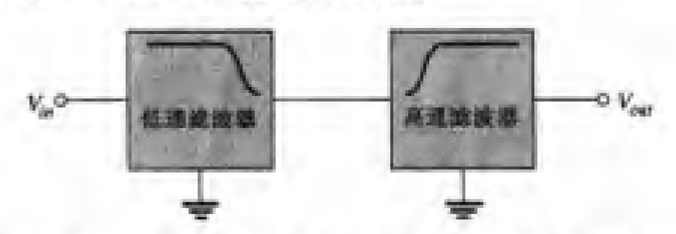


图 19.20　低通滤波器和高通滤波器组合形成带通滤波器

如果低通滤波器的特征频率 $f_{c(l)}$ 高于高通滤波器的特征频率 $f_{c(h)}$，那么响应曲线将会重叠。所以，除了 $f_{c(h)}$ 到 $f_{c(l)}$ 这一频率范围外的所有信号都会被除去，如图 19.21 所示。

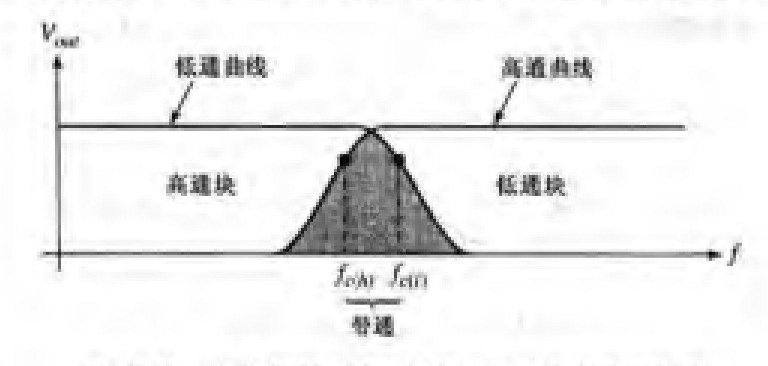


图 19.21　低通滤波器和高通滤波器重叠的响应曲线

例 19.7　一个 $f_c = 2$ kHz 的高通滤波器和一个 $f_c = 2.5$ kHz 的低通滤波器用来构成一个带通滤波器。假设不考虑负载效应，通带的带宽是多少？

解：

$$BW = f_{c(U)} - f_{c(B)} = 2.5\ \text{kHz} - 2\ \text{kHz} = \mathbf{500\ Hz}$$

练习：如果 $f_{c(U)} = 9$ kHz，而带宽是 1.5 kHz，$f_{c(L)}$ 是多少？

19.3.2 串联谐振带通滤波器

一种串联谐振带通滤波器如图 19.22 所示。正如在第 18 章中所介绍的，一个串联谐振滤波器在谐振频率 f_r 时，有最小的阻抗值和最大的电流值。所以在谐振频率时，输入电压的大部分降在了电阻两端。因此，R 两端的输出电压具有带通特性，在谐振频率时输出最大，谐振频率叫做中心频率 f_0。带宽由电路的品质因数 Q 和谐振频率决定，如第 18 章讨论过的。回忆一下，$Q = X_L/R$。

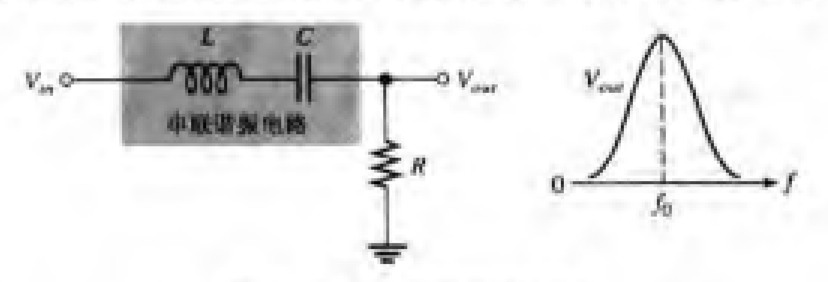


图 19.22 串联谐振带通滤波器

Q 值越大，带宽越窄。Q 值越小，带宽越大。根据 Q 定义的谐振电路的带宽公式用以下方程描述：

$$BW = \frac{f_0}{Q} \tag{19.5}$$

例 19.8 求图 19.23 中滤波器在中心频率(f_0)时的输出电压幅值及带宽。

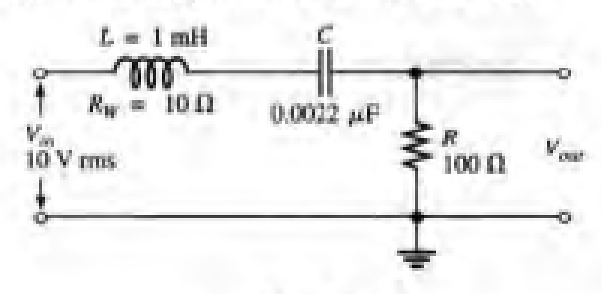


图 19.23

解： 频率等于 f_0 时，谐振电路的阻抗等于线圈电阻 R_W。通过分压公式，得：

$$V_{out} = \left(\frac{R}{R + R_W}\right)V_{in} = \left(\frac{100\ \Omega}{110\ \Omega}\right)10\ \text{V} = \mathbf{9.09\ V}$$

中心频率为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1\ \text{mH})(0.0022\ \mu\text{F})}} = 107\ \text{kHz}$$

频率为 f_0 时，感抗为：

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi(107\ \text{kHz})(1\ \text{mH}) = 672\ \Omega$$

而总电阻为：

$$R_{tot} = R + R_W = 100\ \Omega + 10\ \Omega = 110\ \Omega$$

因此，电路的 Q 值为：

$$Q = \frac{X_L}{R_{tot}} = \frac{672\ \Omega}{110\ \Omega} = 6.11$$

带宽为：

$$BW = \frac{f_0}{Q} = \frac{107\ \text{kHz}}{6.11} = \mathbf{17.5\ kHz}$$

练习：如果用电感值是 1 mH，电阻值是 18 Ω 的电感线圈代替图 19.23 中的电感线圈，那么带宽将受到什么影响？

19.3.3　并联谐振带通滤波器

一种用并联谐振电路构成的带通滤波器如图 19.24 所示。回忆一下，并联谐振电路在谐振时阻抗最大。图 19.24 中的电路起分压作用。在谐振时，振荡电路的阻抗远大于电阻值，所以大部分输入电压加在了振荡电路上，在谐振(中心)频率时输出电压最大。

对高于谐振频率或低于此频率的信号，振荡电路的阻抗逐渐减小，输入电压的大部分加在了 R 的两端。结果，振荡电路两端的输出电压逐渐减小，产生了带通的特性。

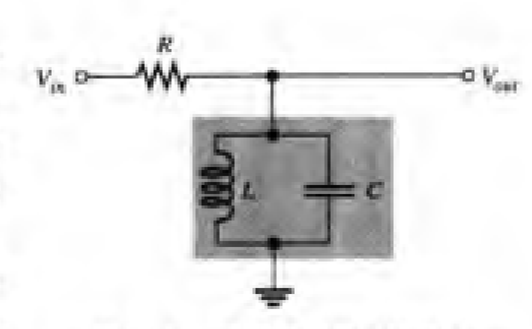


图 19.24　并联谐振带通滤波器

例 19.9　图 19.25 中滤波器的中心频率是多少？假设 $R_W = 0\ \Omega$。

解：滤波器的中心频率就是其谐振频率。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(10\ \mu\text{H})(100\ \text{pF})}} = \mathbf{5.03\ MHz}$$

练习：如果图 19.25 中电路的 C 变为 1000 pF，求其 f_0 的大小。

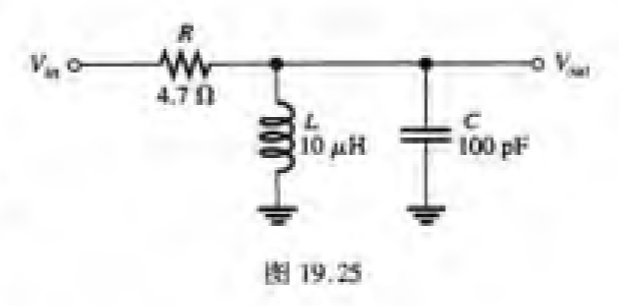


图 19.25

例 19.10　求图 19.26 中带通滤波器的中心频率和带宽，假设电感线圈的阻值为 15 Ω。

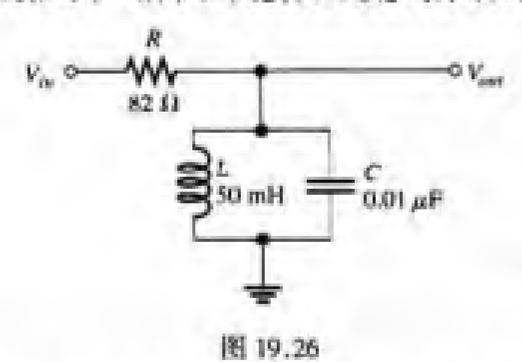


图 19.26

解：回忆第 18 章中的式(18.15)，非理想振荡电路的谐振(中心)频率是：

$$f_0 = \frac{\sqrt{1-(R_W^2C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{1-(15\ \Omega)^2(0.01\ \mu\text{F})/50\ \text{mH}}}{2\pi\sqrt{(50\ \text{mH})(0.01\ \mu\text{F})}} = \mathbf{7.12\ kHz}$$

谐振时线圈的 Q 值为：

$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{2\pi f_0 L}{R_W} = \frac{2\pi(7.12\ \text{kHz})(50\ \text{mH})}{15\ \Omega} = 149$$

滤波器的带宽是：

$$BW = \frac{f_0}{Q} = \frac{7.12\ \text{kHz}}{149} = \mathbf{47.8\ Hz}$$

注意，因为 $Q>10$，可以用简单的公式，即式(18.6)计算 f_0。

练习：已知 Q 值，用简单的公式重新计算 f_0。

19.3 节练习

1. 对于带通滤波器，$f_{c(h)}=29.8\ \text{kHz}$，$f_{c(l)}=30.2\ \text{kHz}$，带宽是多少？
2. 一并联谐振带通滤波器有如下参数：$R_W=15\ \Omega$，$L=50\ \mu\text{H}$，$C=470\ \text{pF}$。求中心频率的近似值。

19.4 带阻滤波器

带阻滤波器实质上是响应形式与带通滤波器相反的滤波器。带阻滤波器允许除阻带外的所有频率信号通过。

在学完这一节后，读者应该能够：

- 分析带阻滤波器的工作原理
- 描述用低通和高通滤波器如何组成一个带阻滤波器
- 解释串联谐振带阻滤波器
- 解释并联谐振带阻滤波器
- 计算带阻滤波器的带宽和输出电压

图 19.27 给出了一般带阻滤波器的响应曲线。

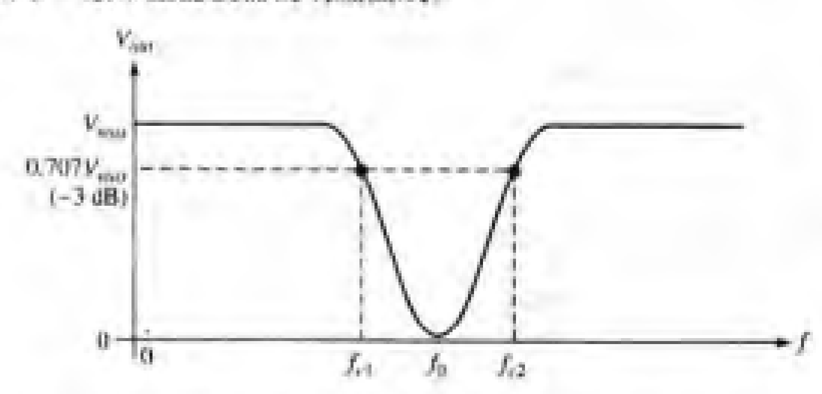


图 19.27 一般带阻滤波器的响应曲线

19.4.1 低通/高通滤波器

带阻滤波器可以由一个低通滤波器和一个高通滤波器构成，如图 19.28 所示。

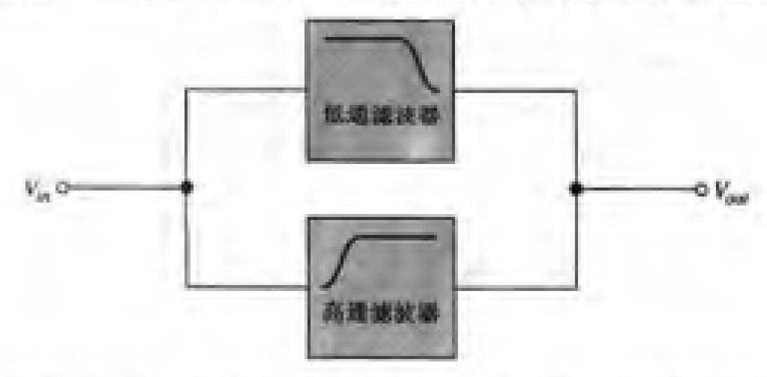


图 19.28 由一个低通滤波器和一个高通滤波器构成带阻滤波器

如果低通滤波器的特征频率 $f_{c(l)}$ 设置得比高通滤波器的特征频率 $f_{c(h)}$ 更低，那么可以得到图 19.29 中所示的带阻特性。

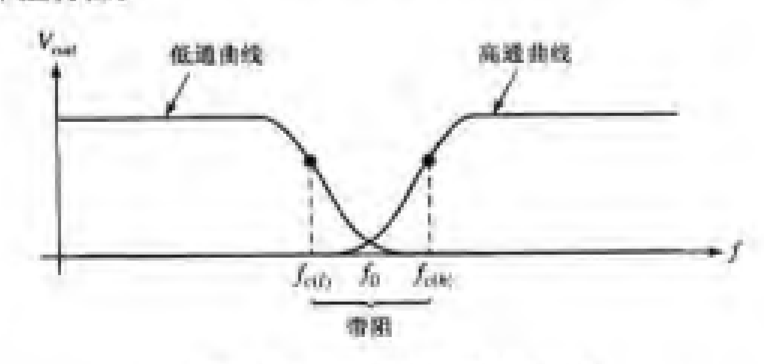


图 19.29 带阻滤波器的响应曲线

19.4.2 串联谐振带阻滤波器

用在带阻滤波器中的一个串联谐振电路如图 19.30 所示。本质上其工作原理如下：在谐振频率时阻抗值最小，所以输出电压最小，输入电压的大部分都降在 R 上。在谐振频率两端，阻抗增加，输出端电压增大。

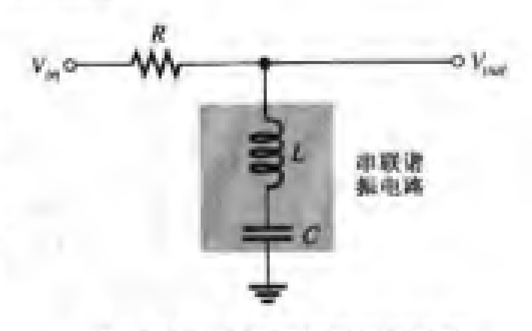


图 19.30 串联谐振带阻滤波器

例 19.11 求图 19.31 中频率为 f_0 时的输出电压幅值及电路带宽。

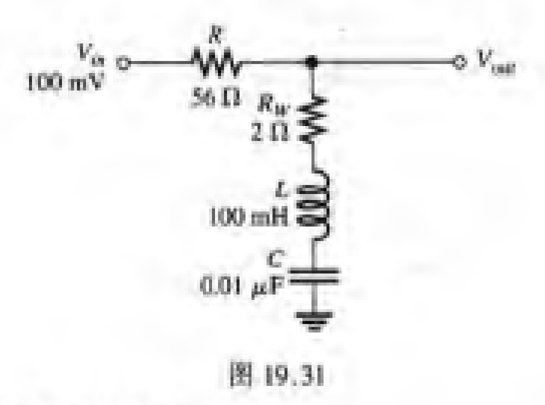


图 19.31

解：因为谐振时 $X_L = X_C$，所以输出电压为：

$$V_{out} = \left(\frac{R_W}{R + R_W}\right)V_{in} = \left(\frac{2\ \Omega}{58\ \Omega}\right)100\ \text{mV} = \mathbf{3.45\ mV}$$

为了求带宽，需计算中心频率和线圈的 Q 值。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(100\ \text{mH})(0.01\ \mu\text{F})}} = 5.03\ \text{kHz}$$

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi fL}{R} = \frac{2\pi(5.03\ \text{kHz})(100\ \text{mH})}{58\ \Omega} = \frac{3.16\ \text{k}\Omega}{58\ \Omega} = 54.5$$

$$BW = \frac{f_0}{Q} = \frac{5.03\ \text{kHz}}{54.5} = \mathbf{92.3\ Hz}$$

练习：假设图 19.31 中 $R_W = 10\ \Omega$，求 V_{out} 以及带宽。

19.4.3 并联谐振带阻滤波器

用在带阻滤波器中的一个并联谐振电路如图 19.32 所示。在谐振频率时，振荡电路的阻抗最大，所以输入电压的大部分都加在其两端，在谐振时只有很少的电压加在 R 的两端。频率高于或低于谐振频率时，振荡电路的阻抗减小，输出电压增加。

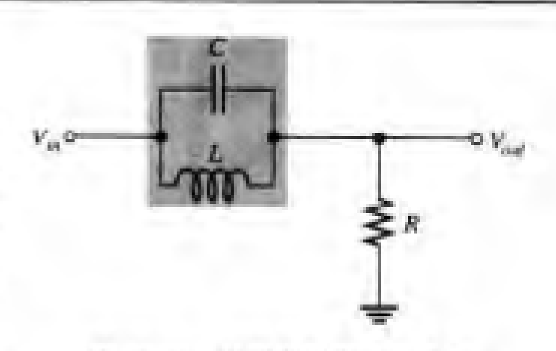


图 19.32 并联谐振带阻滤波器

例 19.12 求图 19.33 中滤波器的中心频率。画出输出特性曲线，标出最小和最大输出电压。

解：中心频率是：

$$f_0 = \frac{\sqrt{1 - R_W^2 C/L}}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{1 - (8\ \Omega)^2(150\ \text{pF})/5\ \mu\text{H}}}{2\pi\sqrt{(5\ \mu\text{H})(150\ \text{pF})}} = \mathbf{5.79\ MHz}$$

在中心(谐振)频率时：

$$X_L = 2\pi f_0 L = 2\pi(5.79\ \text{MHz})(5\ \mu\text{H}) = 182\ \Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{182\ \Omega}{8\ \Omega} = 22.8$$

$$Z_r = R_W(Q^2 + 1) = 8\ \Omega(22.8^2 + 1) = 4.17\ \text{k}\Omega \quad (\text{纯电阻的})$$

接着，运用分压公式求出最小输出电压幅值。

$$V_{out(min)} = \left(\frac{R}{R + Z_r}\right)V_{in} = \left(\frac{560\ \Omega}{4.73\ \text{k}\Omega}\right)10\ \text{V} = 1.18\ \text{V}$$

在频率为零时，因为 $X_C = \infty$ 而 $X_L = 0\ \Omega$，故振荡电路的阻抗等于 R_W。所以，频率小于谐振频率时，电路的最大输出电压为：

$$V_{out(max)} = \left(\frac{R}{R + R_W}\right)V_{in} = \left(\frac{560\ \Omega}{568\ \Omega}\right)10\ \text{V} = 9.86\ \text{V}$$

频率增加到远大于 f_0 时，X_c 接近于 0 Ω，而 V_{out} 接近于 V_{in}(10 V)。响应曲线如图 19.34 所示。

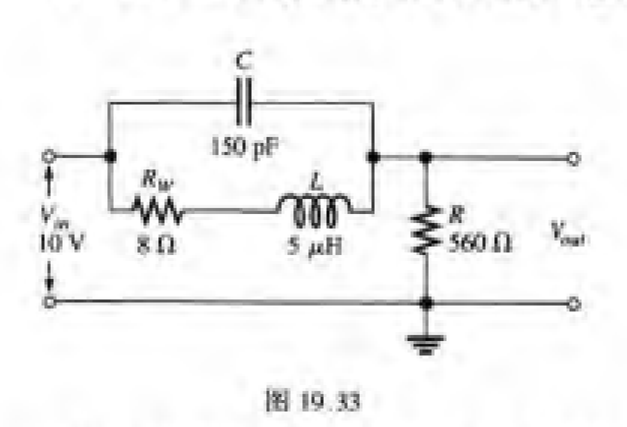


图 19.33

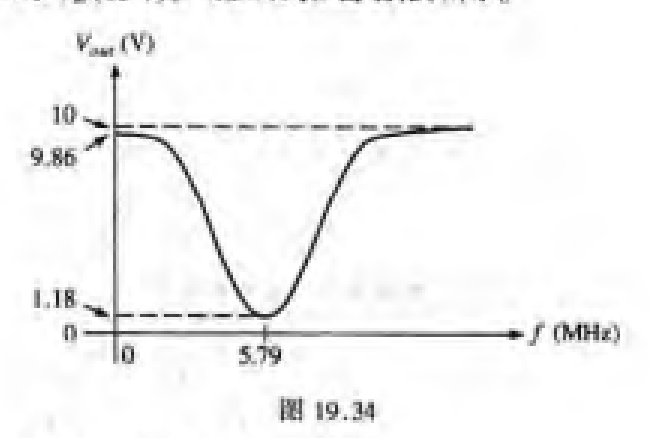


图 19.34

练习：在图 19.33 所示的电路中，如果 $R = 1.0\ \text{k}\Omega$，最小输出电压是多少？

19.4 节练习

1. 带阻滤波器与带通滤波器有什么不同？
2. 说出三种组成带阻滤波器的基本方法。

技术实践

在本技术实践中，将依据一系列示波器测量值画出两种滤波器的频率响应曲线，并且区别不同情况下滤波器的种类。滤波器放在图 19.35 所示的封装模块中。只须关心如何确定滤波器的响应特性而不必考虑其内部组成。

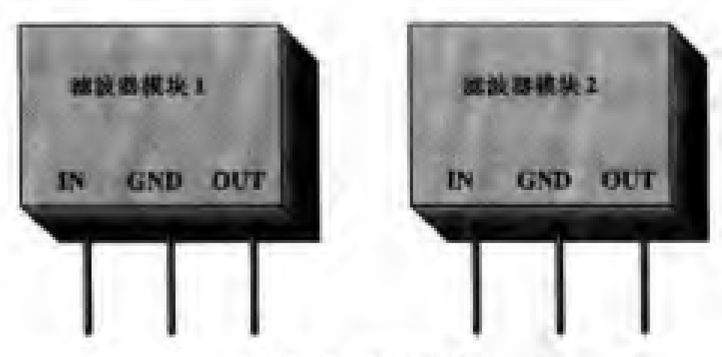


图 19.35　滤波器模块

滤波器测量与分析

■ 参考图 19.36，根据示波器测量的 4 组数值，画出被测滤波器的波特图，明确可使用的频率，并区别滤波器的类型。

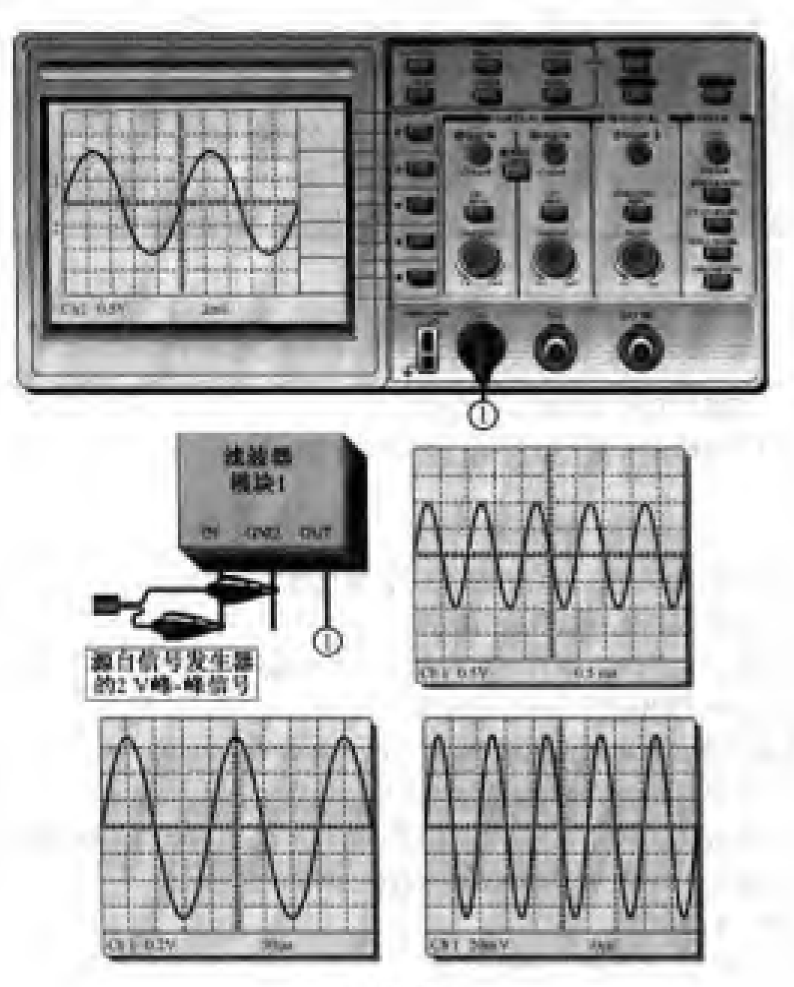


图 19.36

■ 参考图 19.37,根据示波器测量的 6 组数值,画出被测滤波器的波特图,明确可使用的频率,并区别滤波器的类型。

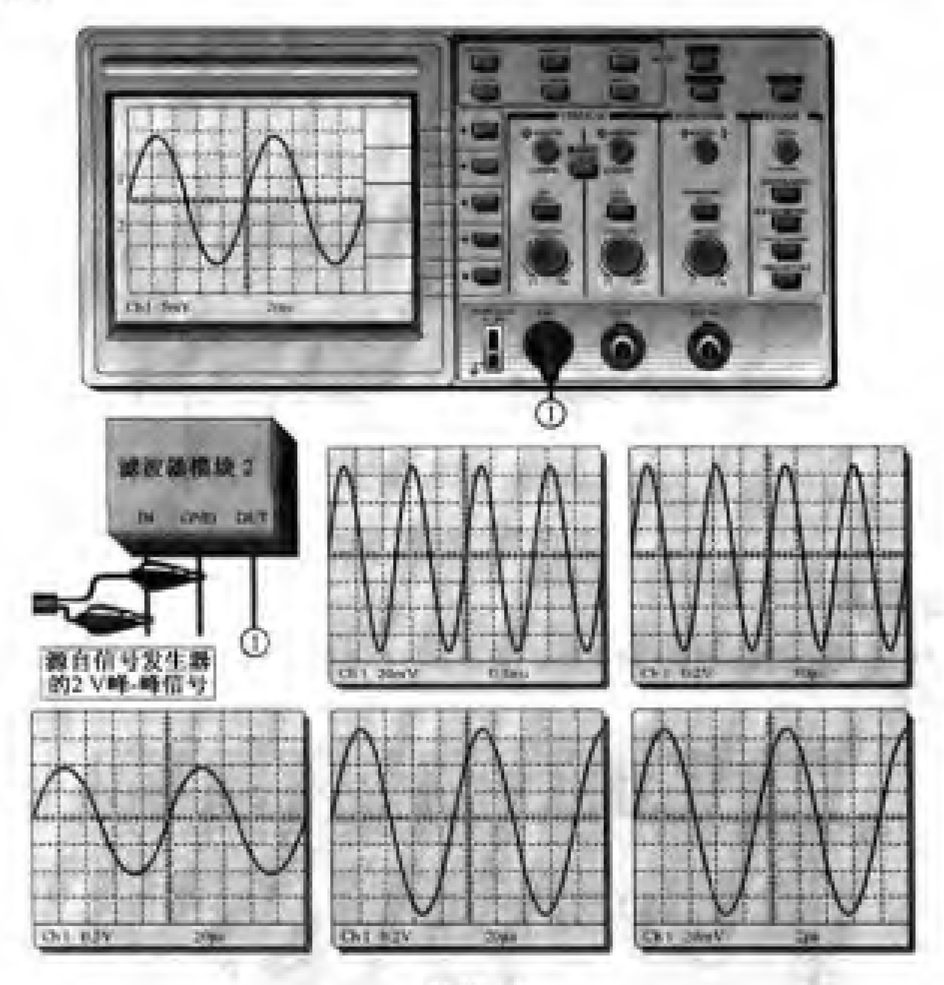


图 19.37

技术实践练习

1. 解释图 19.36 中的波形如何说明滤波器的类型。
2. 解释图 19.37 中的波形如何说明滤波器的类型。

小结

■ 在 *RC* 低通滤波器中,输出电压取自电容的两端,输出滞后于输入。
■ 在 *RL* 低通滤波器中,输出电压取自电阻的两端,输出滞后于输入。
■ 在 *RC* 高通滤波器中,输出电压取自电阻的两端,输出超前于输入。
■ 在 *RL* 高通滤波器中,输出电压取自电感的两端,输出超前于输入。
■ 基本 *RC* 和 *RL* 滤波器的拐点变化速率是 −20 dB/十倍频程。
■ 带通滤波器只允许低临界频率到高临界频率范围间的信号通过,而阻止所有其他频率的信号通过。
■ 带阻滤波器阻止低特征频率到高特征频率范围间的信号通过,而允许其他频率的信号通过。
■ 谐振滤波器的带宽是由电路的品质因数(Q)及谐振频率决定的。
■ 临界频率也叫做 −3 dB 频率。
■ 在临界频率时,输出电压为其最大值的 70.7%。

8. 一高通滤波器在临界频率时的相移是：
   (a) 90° (b) 0° (c) 45° (d) 取决于电抗
9. 在串联谐振带通滤波器中,高 Q 值的结果是：
   (a) 谐振频率变高 (b) 带宽变小 (c) 阻抗变大 (d) 带宽变大
10. 在串联谐振时,
   (a) $X_C = X_L$ (b) $X_C > X_L$ (c) $X_C < X_L$
11. 在并联谐振带通滤波器中,谐振频率是 10 kHz。若带宽是 2 kHz,则低临界频率是：
   (a) 5 kHz (b) 12 kHz (c) 9 kHz (d) 不确定
12. 在一带通滤波器中,谐振时的输出电压：
   (a) 最小 (b) 最大 (c) 是最大值的 70.7% (d) 是最小值的 70.7%
13. 在一带阻滤波器中,谐振时的输出电压：
   (a) 最小 (b) 最大 (c) 是最大值的 70.7% (d) 是最小值的 70.7%
14. 一个并联谐振滤波器,若其 Q 值相当高,则理想情况下,其谐振频率：
   (a) 比串联谐振滤波器的高得多
   (b) 比串联谐振滤波器的低得多
   (c) 等于串联谐振滤波器的谐振频率

故障检修测验

参见图 19.38(a)

1. 若输入电压的频率增加,则 V_{out} 将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变
2. 若 C 增加,则输出电压将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

参见图 19.38(d)

3. 若输入电压频率增加,则 V_{out} 将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变
4. 若 L 增加,则输出电压将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

参见图 19.40

5. 若开关从位置 1 打到位置 2,则临界频率将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变
6. 若开关从位置 2 打到位置 3,则临界频率将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

参见图 19.41(a)

7. 若输入电压的频率增加,则 V_{out} 将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变
8. 若 R 增加到 180 Ω,则输出电压将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

参见图 19.42

9. 若开关从位置 1 打到位置 2,则临界频率将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变
10. 若开关在位置 3,R_5 开路,则 V_{out} 将：
   (a) 增加 (b) 减少 (c) 保持不变

参见图 19.48

11. 若 L_2 开路,则输出电压将:
    (a) 增加　(b) 减少　(c) 保持不变
12. 若 C 短路,则输出电压将:
    (a) 增加　(b) 减少　(c) 保持不变

习题(标有 * 的习题难度较大,奇数题号的习题答案在本书最后)

19.1 节　低通滤波器

1. 一低通滤波器的 $X_C = 500\ \Omega$。$R = 2.2\ k\Omega$,当输入电压等于 10 V rms 时,输出电压 V_{out} 是多少?
2. 一低通滤波器的临界频率是 3 kHz,下列哪些频率信号能够通过?哪些被拒绝?
   (a) 100 Hz　(b) 1 kHz　(c) 2 kHz　(d) 3 kHz　(e) 5 kHz
3. $V_{in} = 10$ V 时,求图 19.38 中每个滤波器在指定频率下的输出电压 V_{out}。

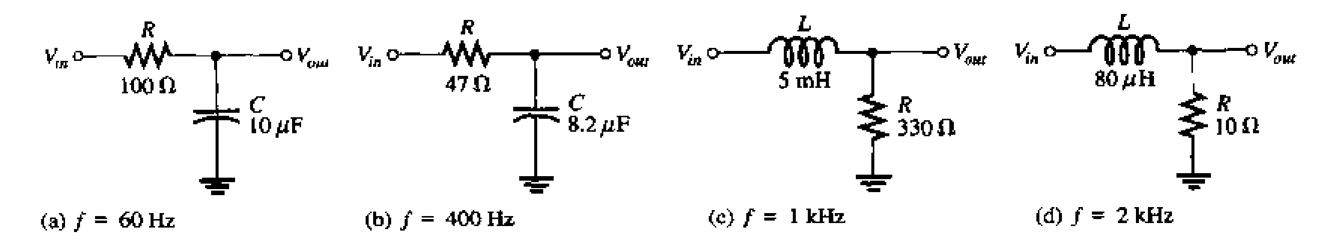


图 19.38

4. 图 19.38 中每个滤波器的 f_c 是多少?若 $V_{in} = 5$ V,求每个滤波器在频率为 f_c 时的输出电压。
5. 对于图 19.39 所示的滤波器,若其临界频率分别为下列各值,求所需的 C 值。
   (a) 60 Hz　(b) 500 Hz　(c) 1 kHz　(d) 5 kHz
6. 对于图 19.40 所示的滤波器网络,求开关处于每个位置时滤波器的临界频率。

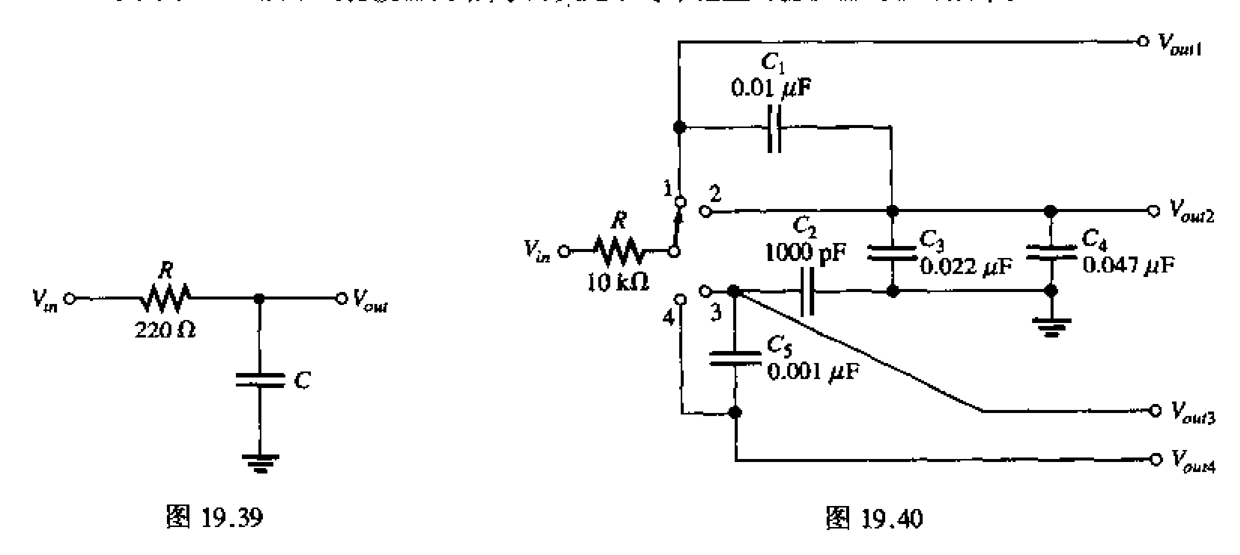


图 19.39　　图 19.40

7. 画出习题 5 中每种情况下的波特图。
8. 对下列每种情况,用 dB 表示电压比。
   (a) $V_{in} = 1$ V, $V_{out} = 1$ V　(b) $V_{in} = 5$ V, $V_{out} = 3$ V
   (c) $V_{in} = 10$ V, $V_{out} = 7.07$ V　(d) $V_{in} = 25$ V, $V_{out} = 5$ V
9. 加到 RC 低通滤波器上的电压为 8 V rms,在下列不同 dB 值时求输出电压。
   (a) −1 dB　(b) −3 dB　(c) −6 dB　(d) −20 dB

10. 一基本 *RC* 低通滤波器,在 0 dB 输入情况下,求输出电压在下列各频率下的 dB 值(f_c = 1 kHz)。

(a) 10 kHz (b) 100 kHz (c) 1 MHz

19.2节 高通滤波器

11. 一高通滤波器的 $X_C = 500\ \Omega$, $R = 2.2\ \text{k}\Omega$。当输入电压 $V_{in} = 10$ V rms 时,输出电压 V_{out} 是多少?

12. 一高通滤波器的临界频率是 50 Hz,下列哪些频率能够通过? 哪些被拒绝?

(a) 1 Hz (b) 20 Hz (c) 50 Hz (d) 60 Hz (e) 30 kHz

13. 当 $V_{in} = 10$ V 时,求图 19.41 中每个滤波器在指定频率下的输出电压 V_{out}。

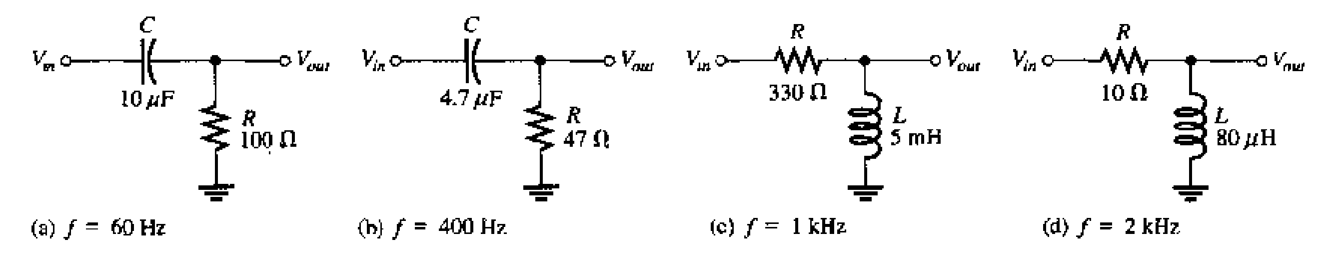


图 19.41

14. 图 19.41 中每个滤波器的 f_c 是多少? 若 $V_{in} = 10$ V,求每个滤波器在频率为 f_c 时的输出电压。

15. 画出图 19.41 中每个滤波器的波特图。

* 16. 对于图 19.42 所示的滤波器网络,求开关处于每个位置时滤波器的临界频率 f_c。

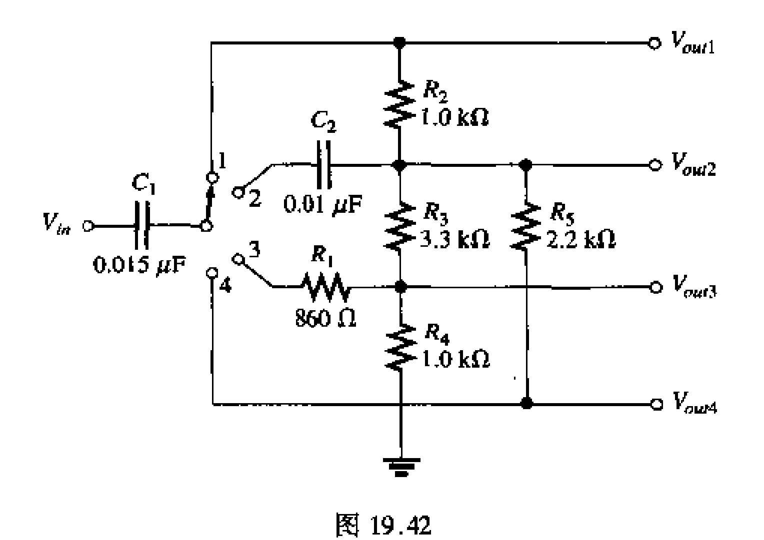


图 19.42

19.3节 带通滤波器

17. 对图 19.43 中的每个滤波器求中心频率。

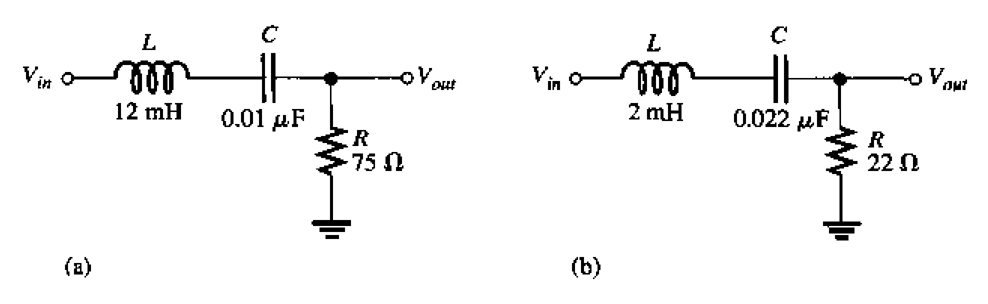


图 19.43

18．假若图 19.43 所示电路中的线圈电阻为 10 Ω，求每个滤波器的带宽。

19．图 19.43 中每个滤波器的上下临界频率分别是多少？假若响应曲线关于 f_0 对称。

20．求图 19.44 中每个滤波器通带的中心频率．忽略 R_W。

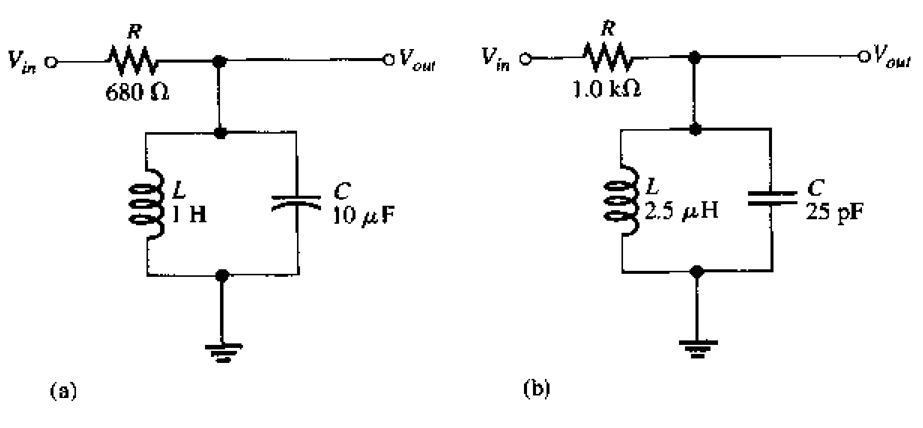


图 19.44

21．假若图 19.44 中线圈的电阻为 4 Ω，在谐振频率时，若已知 V_{in} = 120 V，则输出电压是多少？

*22．对于图 19.45 中所有开关的位置求频响的中心频率，响应中有没有重叠的？假设每个线圈的电阻 R_W = 0 Ω。

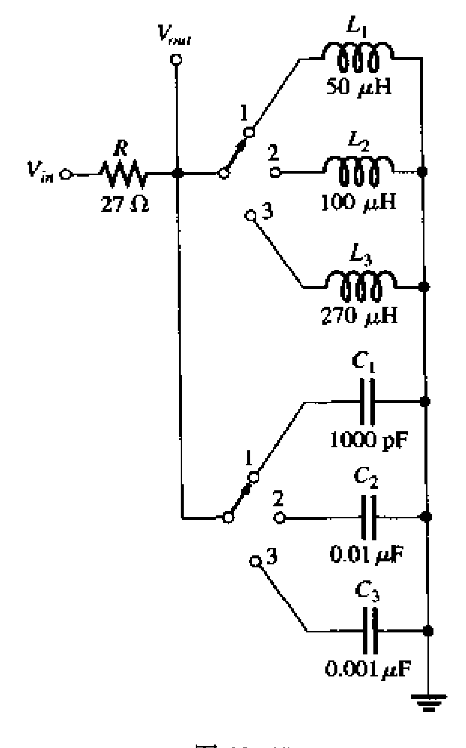


图 19.45

*23．用一并联谐振电路设计一个带通滤波器，要求满足下列条件：BW = 500 Hz，Q = 40，$I_{C(max)}$ = 20 mA，$V_{C(max)}$ = 2.5 V。

19.4 节　带阻滤波器

24．求图 19.46 中每个滤波器的中心频率。

25．求图 19.47 中每个滤波器阻带的中心频率。

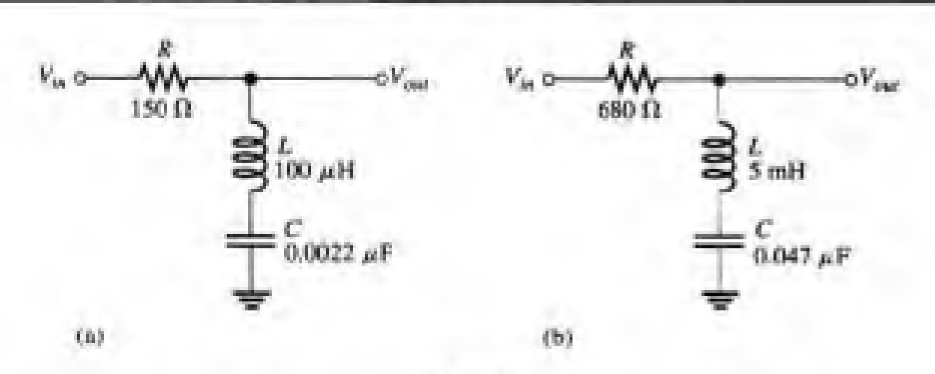


图 19.46

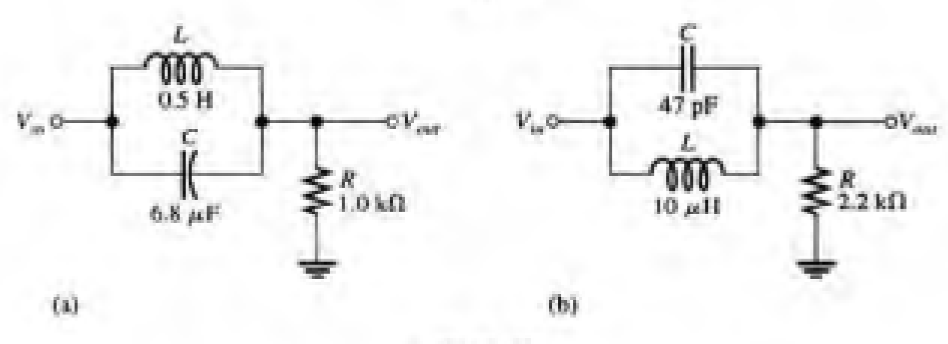


图 19.47

26. 假若图 19.47 中线圈的电阻为 8 Ω,在谐振频率时,输出电压是多少? 已知 V_{in} = 50 V。

*27. 求图 19.48 所示电路的 L_1 和 L_2 的值,使得频率等于 1200 kHz 的信号能够通过而拒绝频率为 456 kHz 的信号。

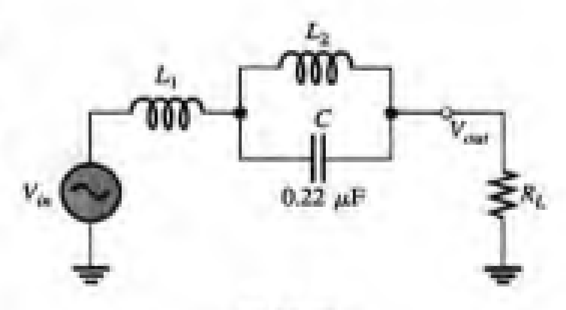


图 19.48

EWB/Multisim 故障检修

这些问题需要使用本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

28. 打开文件 P19.28,确定是否有错。若有,请指出。
29. 打开文件 P19.29,确定是否有错。若有,请指出。
30. 打开文件 P19.30,确定是否有错。若有,请指出。
31. 打开文件 P19.31,确定是否有错。若有,请指出。
32. 打开文件 P19.32,确定是否有错。若有,请指出。
33. 打开文件 P19.33,确定是否有错。若有,请指出。
34. 打开文件 P19.34,求电路的中心频率。
35. 打开文件 P19.35,求电路的带宽。

答案

19.1 节 低通滤波器

1. 通带是 0 Hz 到 2.5 kHz。
2. $\mathbf{V}_{out} = 100\angle -88.9°$ mV rms
3. $20\log(V_{out}/V_{in}) = -9.54$ dB

19.2 节 高通滤波器

1. $V_{out} = 0.707$ V
2. $\mathbf{V}_{out} = 9.98\angle 3.81°$ V

19.3 节　带通滤波器

1. $BW = 30.2\ \text{kHz} - 29.8\ \text{kHz} = 400\ \text{Hz}$
2. $f_0 \cong 1.04\ \text{MHz}$

19.4 节　带阻滤波器

1. 带阻滤波器阻止某一频带范围内的信号,而不是令其通过。
2. 高通和低通滤波器的组合,串联谐振电路,并联谐振电路。

技术实践

1. 波形表明:和低通滤波器一样,输出信号的幅值随着频率的增加而减少。
2. 波形表明:和带通滤波器一样,输出信号的幅值在 10 kHz 时最大,然后在此频率两端逐渐减少。

实例相关练习

19.1　-1.41 dB

19.2　7.23 kHz

19.3　f_c 增至 159 kHz,拐点速率保持在 -20 dB/decade。

19.4　f_c 增至 350 kHz,拐点速率保持在 -20 dB/decade。

19.5　-60 dB

19.6　$C = 0.723\ \mu\text{F}$; $V_{out} = 4.98\ \text{V}$; $\phi = 5.7°$

19.7　10.5 kHz

19.8　BW 增至 18.8 kHz。

19.9　1.59 MHz

19.10　7.12 kHz (没有很大的区别)

19.11　$V_{out} = 15.2\ \text{mV}$; $BW = 105\ \text{Hz}$

19.12　1.94 V

自测题

1.(c)　2.(b)　3.(a)　4.(b)　5.(d)　6.(c)　7.(a)　8.(c)　9.(b)
10.(a)　11.(c)　12.(b)　13.(c)　14.(c)

故障检修测验

1.(b)　2.(b)　3.(b)　4.(b)　5.(b)　6.(a)　7.(a)　8.(a)　9.(a)
10.(c)　11.(b)　12.(a)

第 20 章　交流分析中的电路理论

引言

几个重要的理论已经在第 8 章中介绍了，重点是在直流电路分析中的应用。本章是对该部分内容的延伸，重点是分析带有动态元件的交流电路时的应用。

本章中的理论使得对某些特定类型电路的分析更加容易。这些理论并非取代了欧姆定律和基尔霍夫定律，而是在特定条件下同这些理论一起使用。

虽然已经分析过本章中涉及的理论，但对于其用途的重述仍然是有益的。叠加定理有助于分析具有多个电源的电路。戴维南定理和诺顿定理提供了将电路化简为简单等效形式的方法。最大功率传递理论用于给定电路时，求负载获得最大功率的情况。

本章目标

- 应用叠加定理分析交流电路
- 应用戴维南定理化简动态交流电路
- 应用诺顿定理化简动态交流电路
- 应用最大功率传递定论

主要术语

- 叠加定理
- 等效电路
- 戴维南定理
- 诺顿定理
- 复共轭

技术实践

在技术实践中，将分析一个带通滤波器模块来确定其内部的元件参数。将运用戴维南定理求解最大功率传递时的最佳负载阻抗。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

20.1　叠加定理

第 8 章介绍了叠加定理在直流电路中的应用。在本章，主要将叠加定理应用于含交流电源和阻抗元件的电路。

学习完本节后，读者应该能够：

- 应用叠加定理分析交流电路
- 描述叠加定理
- 列举运用该理论的步骤

叠加定理描述如下：

对于一个多电源电路中任意给定的某一支路，其电流可以通过求每一电源单独作用于电路时，在该支路中所产生的电流来得到，此时其他电源由其内阻抗代替。该支路中的总电流为各个电源单独作用时在该支路产生电流的相量和。

叠加定理的应用步骤如下：

第一步　电路中只留下一个电源，其他电源用其内阻抗代替。对于理想电压源，其内阻抗为零。对于理想电流源，其内阻抗为无穷大。我们把这一步骤称为将独立源置零。

第二步　在所保留的电源单独作用下，求出感兴趣支路中的电流。

第三步　令其他每个电源依次单独作用，重复第一步和第二步。该步骤完成后，可以得到与电源个数相等的若干个电流值。

第四步　将每一个电流相量值进行相加。

下面的三道例题说明了这个步骤。

例 20.1　运用叠加定理，求图 20.1 中电阻 R 上的电流。假设电源内阻抗为零。

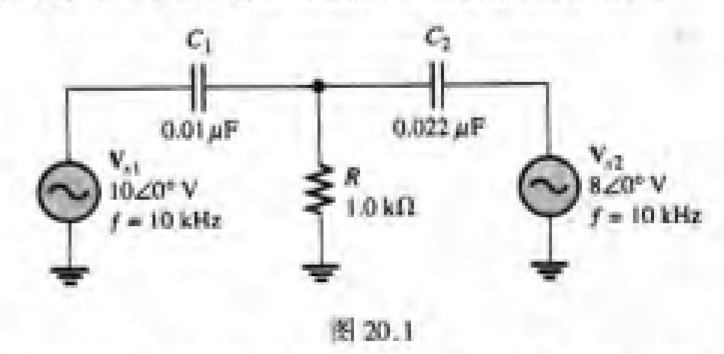


图 20.1

解：第一步　将 V_{s2} 用其内阻抗（等于 0）代替，得到由 V_{s1} 单独作用时在 R 中所产生的电流，如图 20.2 所示。

图 20.2

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi fC_1} = \frac{1}{2\pi(10\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 1.59\text{ k}\Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi fC_2} = \frac{1}{2\pi(10\text{ kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 723\ \Omega$$

从 V_{s1} 看进去，电路的阻抗是：

$$\begin{aligned}\mathbf{Z} &= \mathbf{X}_{C1} + \frac{\mathbf{R}\mathbf{X}_{C2}}{\mathbf{R} + \mathbf{X}_{C2}} = 1.59\angle -90^\circ\text{ k}\Omega + \frac{(1.0\angle 0^\circ\text{ k}\Omega)(723\angle -90^\circ\ \Omega)}{1.0\text{ k}\Omega - j723\ \Omega} \\ &= 1.59\angle -90^\circ\text{ k}\Omega + 588\angle -54.1^\circ\ \Omega \\ &= -j1.59\text{ k}\Omega + 345\ \Omega - j476\ \Omega = 345\ \Omega - j2.07\text{ k}\Omega\end{aligned}$$

将电路阻抗转换为极坐标形式为:

$$Z = 2.10\angle -80.5^\circ\ \text{k}\Omega$$

电源1产生的总电流是:

$$I_{s1} = \frac{V_{s1}}{Z} = \frac{10\angle 0^\circ\ \text{V}}{2.10\angle -80.5^\circ\ \text{k}\Omega} = 4.76\angle 80.5^\circ\ \text{mA}$$

运用分流公式,由 V_{s1} 产生的流经 R 上的电流为:

$$\begin{aligned} I_{R1} &= \left(\frac{X_{C2}\angle -90^\circ}{R - jX_{C2}}\right) I_{s1} = \left(\frac{723\angle -90^\circ\ \Omega}{1.0\ \text{k}\Omega - j723\ \Omega}\right) 4.76\angle 80.5^\circ\ \text{mA} \\ &= (0.588\angle -54.9^\circ\ \Omega)(4.76\angle 80.5^\circ\ \text{mA}) = 2.80\angle 25.6^\circ\ \text{mA} \end{aligned}$$

第二步 将 V_{s1} 用其内阻抗(等于0)代替,得到由 V_{s2} 单独作用所产生的电流,如图20.3所示。

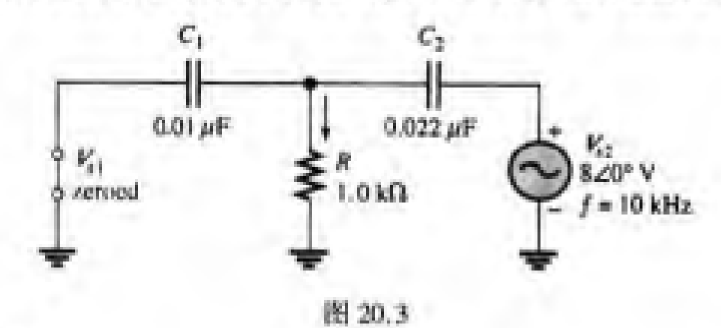


图 20.3

从 V_{s2} 看进去,电路阻抗是:

$$\begin{aligned} Z &= X_{C2} + \frac{RX_{C1}}{R + X_{C1}} = 723\angle -90^\circ\ \Omega + \frac{(1.0\angle 0^\circ\ \text{k}\Omega)(1.59\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega)}{1.0\ \text{k}\Omega - j1.59\ \text{k}\Omega} \\ &= 723\angle -90^\circ\ \Omega + 847\angle -32.2^\circ\ \Omega \\ &= -j723\ \Omega + 717\ \Omega - j451\ \Omega = 717\ \Omega - j1174\ \Omega \end{aligned}$$

将电路阻抗转换为极坐标形式:

$$Z = 1376\angle -58.6^\circ\ \Omega$$

由电源2产生的电流是:

$$I_{s2} = \frac{V_{s2}}{Z} = \frac{8\angle 0^\circ\ \text{V}}{1376\angle -58.6^\circ\ \Omega} = 5.81\angle 58.6^\circ\ \text{mA}$$

运用分流公式,由 V_{s2} 产生的流经 R 上的电流为:

$$\begin{aligned} I_{R2} &= \left(\frac{X_{C1}\angle -90^\circ}{R - jX_{C1}}\right) I_{s2} \\ &= \left(\frac{1.59\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega}{1.0\ \text{k}\Omega - j1.59\ \text{k}\Omega}\right) 5.81\angle 58.6^\circ\ \text{mA} = 4.91\angle 26.4^\circ\ \text{mA} \end{aligned}$$

第三步 将电阻的两个电流相量分别转换成各自的直角坐标形式,相加后得到流经 R 上的总电流。

$$\begin{aligned} I_{R1} &= 2.80\angle 25.6^\circ\ \text{mA} = 2.53\ \text{mA} + j1.21\ \text{mA} \\ I_{R2} &= 4.91\angle 26.4^\circ\ \text{mA} = 4.40\ \text{mA} + j2.18\ \text{mA} \\ I_R &= I_{R1} + I_{R2} = 6.93\ \text{mA} + j3.39\ \text{mA} = \mathbf{7.71\angle 26.1^\circ\ mA} \end{aligned}$$

练习:如果图20.1中的 $V_{s2} = 8\angle 180^\circ$ V,求 I_R。

例 20.2 求图20.4中电感中的电流,假设电源是理想的。

解:第一步 将电源 I_{s2} 用开路代替,求出由电流源 I_{s1} 单独作用引起的电感电流,如图20.5所示。正如所看到的,来自电流源 I_{s1} 的电流100 mA全部通过电感。

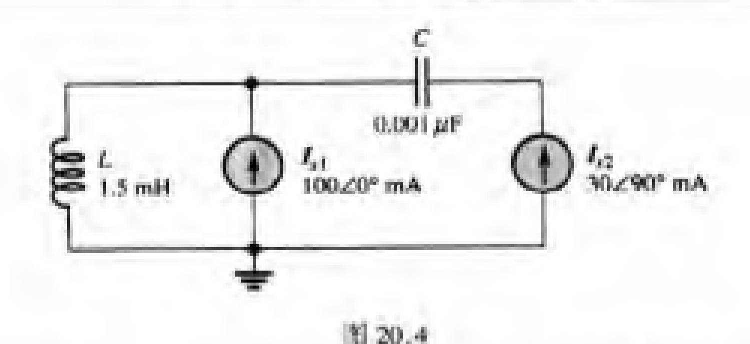


图 20.4

第二步　将电源 I_{s1} 用开路代替，求出由电流源 I_{s2} 单独作用引起的电感电流，如图 20.6 所示。注意，来自电流源 I_{s2} 的电流 30 mA 全部通过电感。

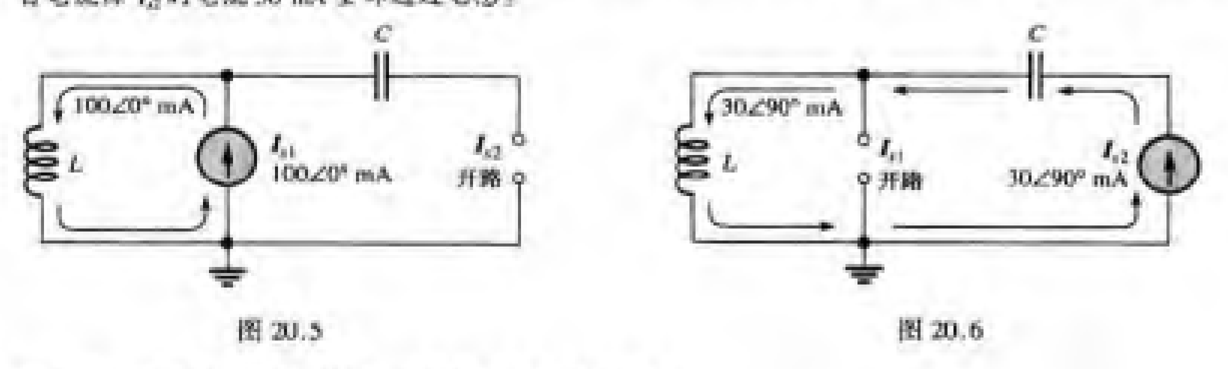


图 20.5　　　　图 20.6

第三步　将两个电流相量叠加，得到流经电感的总电流。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I}_L &= \boldsymbol{I}_{L1} + \boldsymbol{I}_{L2}\\ &= 100\angle 0^\circ\ \text{mA} + 30\angle 90^\circ\ \text{mA} = 100\ \text{mA} + j30\ \text{mA}\\ &= \mathbf{104\angle 16.7^\circ\ mA}\end{aligned}$$

练习：求图 20.4 中流经电容的电流。

例 20.3　求图 20.7 中流经负载电阻 R_L 中的总电流。假设电源是理想的。

解：第一步　将直流电压源 V_{s2} 置零（用其内阻抗代替），求出由 V_{s1} 单独作用引起的流经 R_L 的电流，如图 20.8 所示。从 V_{s1} 看进去，电路阻抗是：

$$\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{X}_C + \frac{\boldsymbol{R}_1\boldsymbol{R}_L}{\boldsymbol{R}_1 + \boldsymbol{R}_L}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi(1.0\ \text{kHz})(0.22\ \mu\text{F})} = 723\ \Omega$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Z} &= 723\angle -90^\circ\ \Omega + \frac{(1.0\angle 0^\circ\ \text{k}\Omega)(2\angle 0^\circ\ \text{k}\Omega)}{3\angle 0^\circ\ \text{k}\Omega}\\ &= -j723\ \Omega + 667\ \Omega = 984\angle -47.3^\circ\ \Omega\end{aligned}$$

由电源 1 产生的总电流为：

$$\boldsymbol{I}_{R_{s1}} = \frac{\boldsymbol{V}_{s1}}{\boldsymbol{Z}} = \frac{5\angle 0^\circ\ \text{V}}{984\angle -47.3^\circ\ \Omega} = 5.08\angle 47.3^\circ\ \text{mA}$$

运用分流公式，得出由 V_{s1} 产生的流经 R_L 的电流为：

$$\boldsymbol{I}_{RL(s1)} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_L}\right)\boldsymbol{I}_{t1} = \left(\frac{1.0\ \text{k}\Omega}{3\ \text{k}\Omega}\right)5.08\angle 47.3^\circ\ \text{mA} = 1.69\angle 47.3^\circ\ \text{mA}$$

第二步　将电压源 V_{s1} 置零（用其内阻抗代替），求出由 V_{s2} 引起的流经 R_L 的电流，如图 20.9 所示。从 V_{s2} 看进去，阻抗大小是：

$$Z = R_1 + R_L = 3\ \text{k}\Omega$$

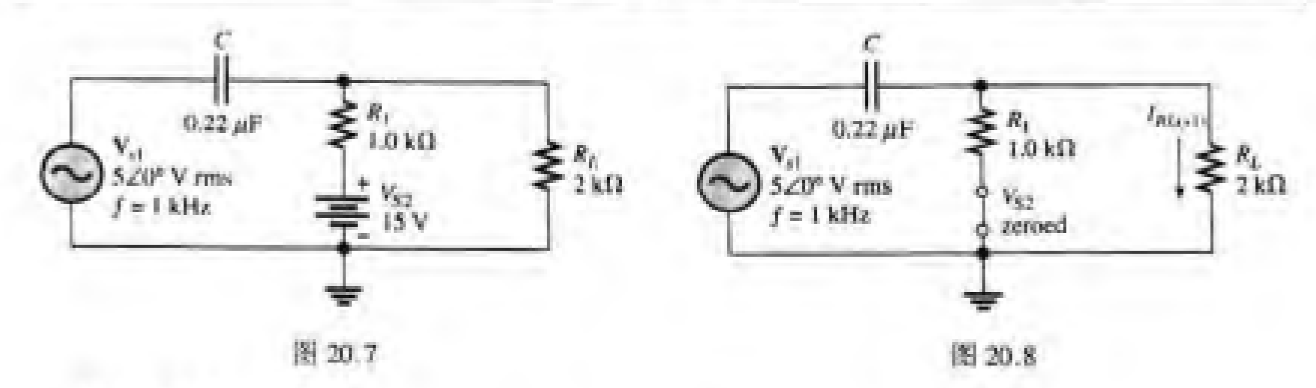


图 20.7　　　　图 20.8

由 V_{S2} 产生的电流是：

$$I_{RL(S2)} = \frac{V_{S2}}{Z} = \frac{15\text{ V}}{3\text{ k}\Omega} = 5\text{ mA dc}$$

第三步　运用叠加定理，流经 R_L 的总电流是 1.69∠47.3° mA，加载于 5 mA 直流上，如图 20.10 所示。

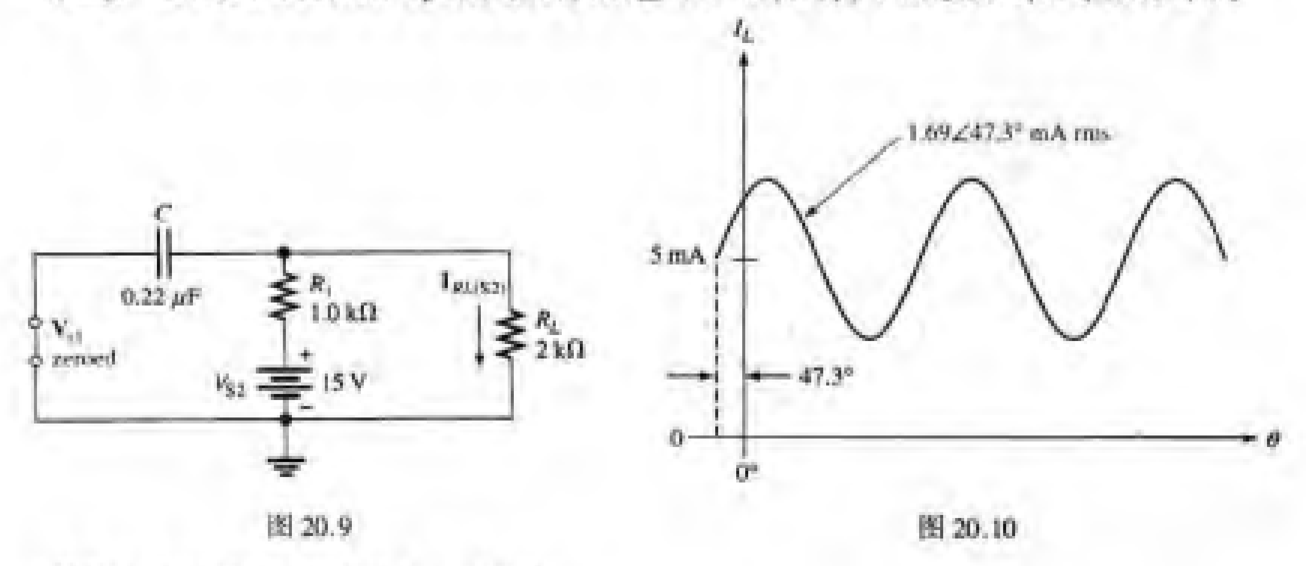


图 20.9　　　　图 20.10

练习：如果 V_{S2} 变为 9 V，求流经 R_L 的电流。

20.1 节练习

1. 在一给定电路支路中，若两个大小相等的电流，在任何时刻方向都是相反的，那么在该时刻总电流为多少？
2. 为什么在多电源电路的分析中叠加定理很有用？
3. 运用叠加定理，求图 20.11 中流经 R 的电流的幅值。

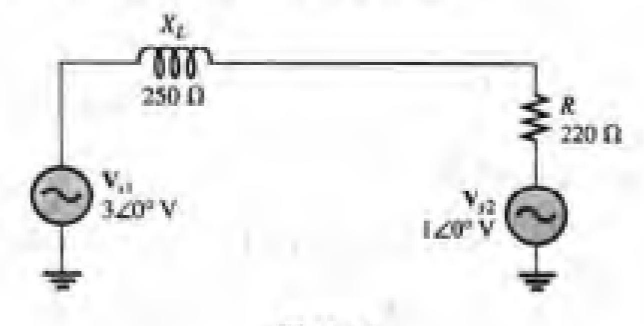


图 20.11

20.2　戴维南定理

戴维南定理应用于交流电路中，提供了将任何电路化简为由一个等效交流电压源串联一个等效阻抗的方法。

在学完本节后，读者应该能够：

- 运用戴维南定理化简交流阻抗电路
- 描述戴维南等效电路的形式
- 求解戴维南等效交流电压源
- 求解戴维南等效阻抗
- 列举在交流电路中使用戴维南定理的步骤

戴维南等效电路的形式如图 20.12 所示。无论原始电路如何复杂，总可以简化为其等效形式。该等效电压源命名为 V_{th}，等效阻抗命名为 Z_{th}（小写的斜体下标代表交流量）。注意，阻抗在电路图中是用方块表示的，因为等效阻抗可以具有多种形式：纯电阻、纯电容、纯电感，或是电阻同电抗元件的组合。

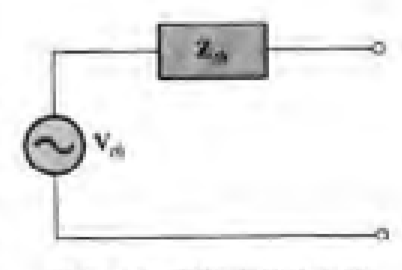


图 20.12　戴维南等效电路

20.2.1　等效

图 20.13(a)说明了一个代表任意复杂程度的交流电路方块图。该电路有两个输出端 A 和 B，负载阻抗 Z_L 连到输出端上。电路产生了电压 V_L 以及电流 I_L，如图中所示。

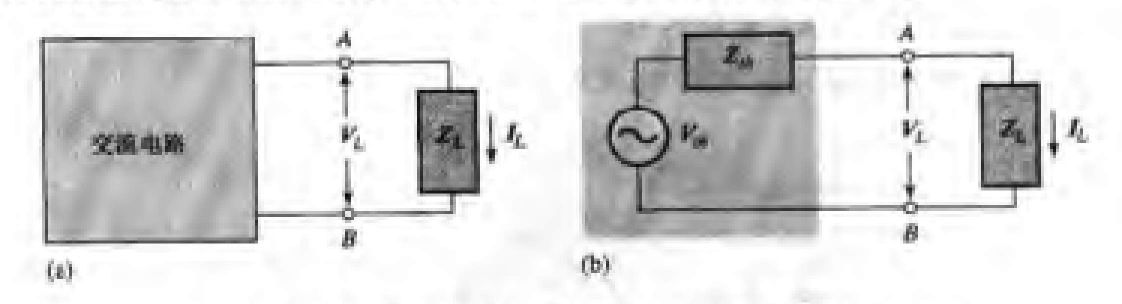


图 20.13　为了分析，将任意复杂的交流电路化简为戴维南等效电路

运用戴维南定理，方块中的电路可以化简为等效形式，如图 20.13(b)中的浅色区域所示。等效的含义是：相同的阻抗接在原始电路和戴维南等效电路时，负载电压和电流都是相等的。所以就负载而言，原始电路与戴维南等效电路是没有区别的，负载无论是接在原始电路还是戴维南等效电路，其电流和电压都是相同的。对于交流电路，其等效电路是针对于一特定频率的。频率改变时，等效电路必须重新计算。

20.2.2　戴维南等效电压（V_{th}）

正如所看到的，等效电压 V_{th} 是完整戴维南等效电路的一部分。

戴维南等效电压的定义：电路中两指定端间的开路电压。

举例说明，假设某交流电路中有一电阻连接于两个指定端 A 和 B，如图 20.14(a)所示。希望求出从"R"两端看进去电路的戴维南等效电路。V_{th} 是移走 R 后 A 和 B 两端的电压，如图 20.14(b)

所示。求戴维南等效电路时,将 A 和 B 端看成开路,并且认为 R 是外电路。以下三道例题说明如何求 V_{th}。

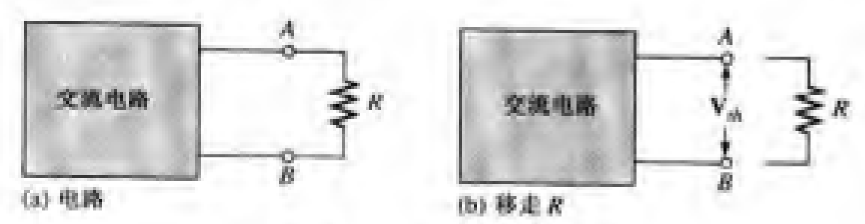


图 20.14 V_{th} 的确定方法

例 20.4 求图 20.15 中去掉 R_L 后电路的 V_{th}。浅色部分代表需要求戴维南等效电路的部分。

解:去掉 R_L,并求从 A 到 B 端的电压(V_{th})。这种情况下,A 到 B 的电压同 X_L 两端的电压相同,通过分压公式进行求解。

图 20.15

$$V_L=\left(\frac{X_L\angle 90^\circ}{R_1+jX_L}\right)V_s$$

$$=\left(\frac{50\angle 90^\circ\ \Omega}{100\ \Omega+j50\ \Omega}\right)$$

$$=\left(\frac{50\angle 90^\circ\ \Omega}{112\angle 26.6^\circ\ \Omega}\right)25\angle 0^\circ\ \text{V}=11.2\angle 63.4^\circ\ \text{V}$$

$$V_{th}=V_{AB}=V_L=\mathbf{11.2\angle 63.4^\circ\ V}$$

练习:如果图 20.15 中的 R_1 变为 47 Ω,求 V_{th}。

例 20.5 对于图 20.16 中的电路,求从 R_L 看进去电路的戴维南等效电压。

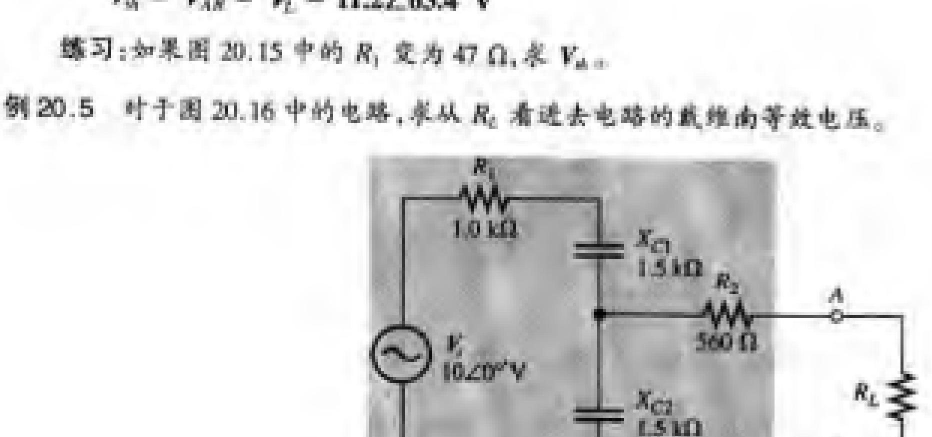


图 20.16

解:A 和 B 端的戴维南等效电压是去掉 R_L 后 A 和 B 间的电压。

R_2 两端没有电压降,因为 A 和 B 间开路,没有电流通过。所以,V_{AB} 等于 V_{C2},可以通过分压公式得到。

$$V_{AB}=V_{C2}=\left(\frac{X_{C2}\angle -90^\circ}{R_1-jX_{C1}-jX_{C2}}\right)V_s=\left(\frac{1.5\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega}{1.0\ \text{k}\Omega-j3\ \text{k}\Omega}\right)10\angle 0^\circ\ \text{V}$$

$$=\left(\frac{1.5\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega}{3.16\angle -71.6^\circ\ \text{k}\Omega}\right)10\angle 0^\circ\ \text{V}=4.75\angle -18.4^\circ\ \text{V}$$

$$V_{th}=V_{AB}=\mathbf{4.75\angle -18.4^\circ\ V}$$

练习:如果图 20.16 中的 R_1 变为 2.2 kΩ,确定 V_{th}。

例 20.6 对于图 20.17，求电路除去 R_L 后的 V_{th}。

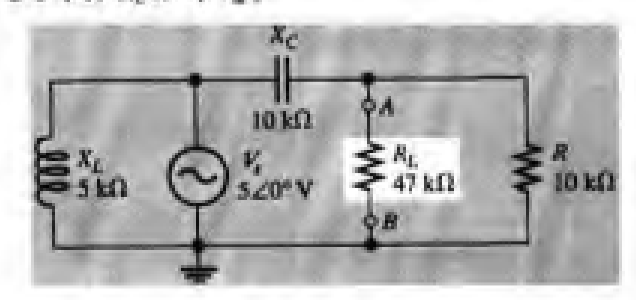


图 20.17

解：首先去掉 R_L，然后求开路电压 V_{th}。在 X_C 和 R 上运用分压公式求 V_{th}。

$$V_{th} = V_R = \left(\frac{R\angle 0^\circ}{R - jX_C}\right)V_s = \left(\frac{10\angle 0^\circ \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega - j10 \text{ k}\Omega}\right)5\angle 0^\circ \text{ V}$$

$$= \left(\frac{10\angle 0^\circ \text{ k}\Omega}{14.1\angle -45^\circ \text{ k}\Omega}\right)5\angle 0^\circ \text{ V} = \mathbf{3.55\angle 45^\circ\ V}$$

注意 L 对结果没有影响，因为在 C 和 R 组合两端的电压为 5 V 电压源。

练习：在图 20.17 中，若 R 为 22 kΩ，R_L 为 39 kΩ，求 V_{th}。

20.2.3 戴维南等效阻抗(Z_{th})

前面的例题已经说明了如何求出戴维南等效电路的一部分。现在，将注意力转移到如何求戴维南等效阻抗 Z_{th} 上来。

戴维南等效阻抗是：在一给定电路中将所有电源用其内阻抗代替时，在两个确定端间呈现的总阻抗。

所以，当想求出电路中任意两端间的 Z_{th} 时，将所有电压源短路处理（任意内阻抗保持串联），将所有电流源开路处理（任意内阻抗保持并联），此时即可确定这两端间的总阻抗。以下三道例题说明了如何求 Z_{th}。

例 20.7 求图 20.18 中除去 R_L 后电路的 Z_{th}。该电路同例 20.4 中的相同。

解：首先将 V_s 用其内阻抗（为零）代替，如图 20.19 所示。

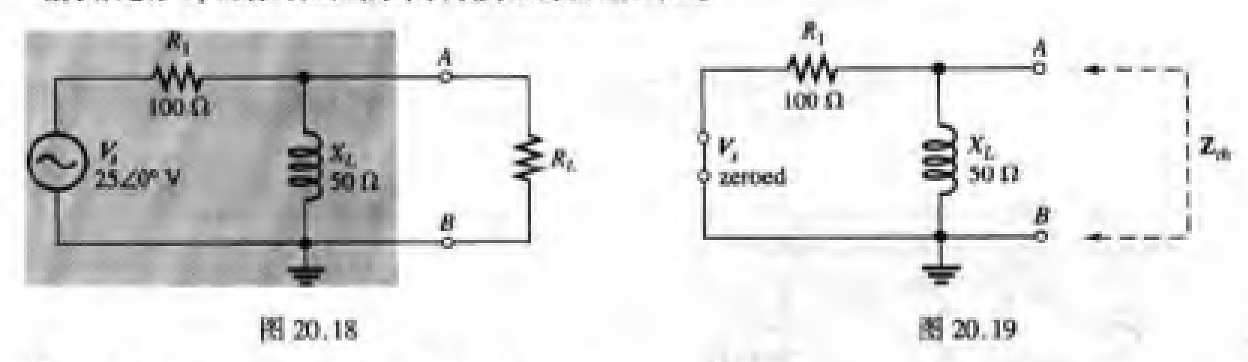


图 20.18　　图 20.19

从 A 和 B 端看进去，R_1 和 X_L 是并联的。所以，

$$Z_{th} = \frac{(R_1\angle 0^\circ)(X_L\angle 90^\circ)}{R_1 + jX_L} = \frac{(100\angle 0^\circ\ \Omega)(50\angle 90^\circ\ \Omega)}{100\ \Omega + j50\ \Omega}$$

$$= \frac{(100\angle 0^\circ\ \Omega)(50\angle 90^\circ\ \Omega)}{112\angle 26.6^\circ\ \Omega} = \mathbf{44.6\angle 63.4^\circ\ \Omega}$$

练习：将 R_1 变为 47 Ω，求 Z_{th}。

例 20.8 对于图 20.20 中的电路，求电路从 R_L 看进去的 $\mathbf{Z}_{th}$。该电路同例 20.5 中的相同。

解：首先将电压源用其内阻抗(为零)代替，如图 20.21 所示。

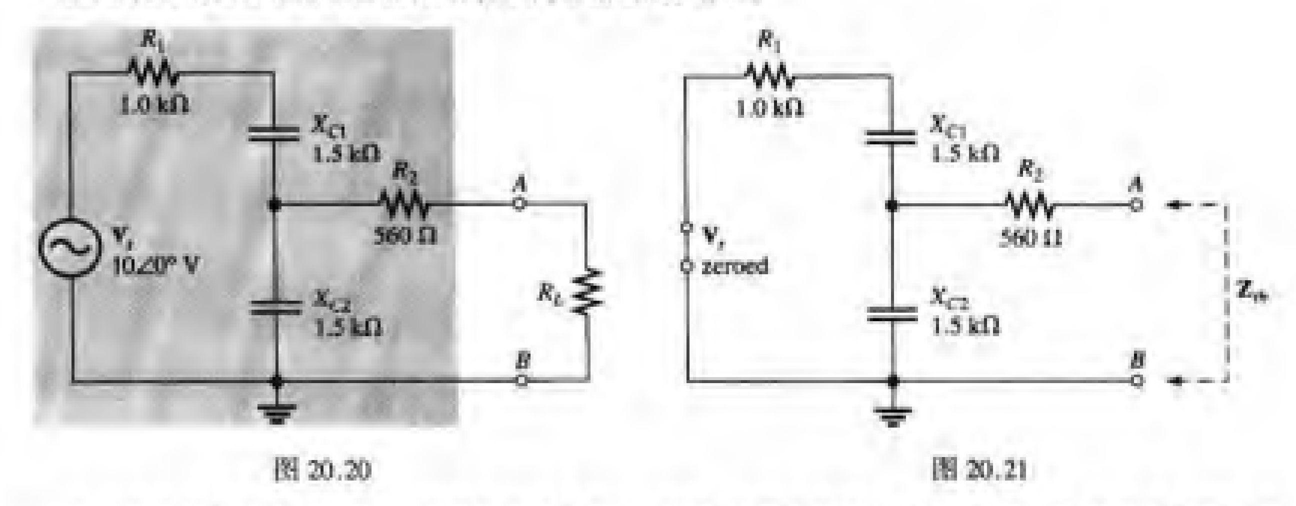


图 20.20 图 20.21

从 A 和 B 端看进去，R_1 和 C_1 串联组合后再和 C_2 并联，这整个组合再和 R_2 串联。$\mathbf{Z}_{th}$ 的计算步骤如下：

$$\begin{aligned}
\mathbf{Z}_{th} &= R_2\angle 0^\circ + \frac{(X_{C2}\angle -90^\circ)(R_1 - jX_{C1})}{R_1 - jX_{C1} - jX_{C2}} \\
&= 560\angle 0^\circ\ \Omega + \frac{(1.5\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega)(1.0\ \text{k}\Omega - j1.5\ \text{k}\Omega)}{1.0\ \text{k}\Omega - j3\ \text{k}\Omega} \\
&= 560\angle 0^\circ\ \Omega + \frac{(1.5\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega)(1.8\angle -56.3^\circ\ \text{k}\Omega)}{3.16\angle -71.6^\circ\ \text{k}\Omega} \\
&= 560\angle 0^\circ\ \Omega + 854\angle -74.7^\circ\ \Omega = 560\ \Omega + 225\ \Omega - j824\ \Omega \\
&= 785\ \Omega - j824\ \Omega = \mathbf{1138\angle -46.4^\circ\ \Omega}
\end{aligned}$$

练习：如果图 20.20 中的 R_1 变为 2.2 kΩ，确定 $\mathbf{Z}_{th}$ 的值。

例 20.9 对于图 20.22 中的电路，求去掉 R_L 后剩下部分电路的 $\mathbf{Z}_{th}$。该电路同例 20.6 中的电路相同。

解：将电压源用其内阻抗(为 0)代替，X_L 实际上对电路没有影响。从开路端看进去 R 和 C 是并联的，如图 20.23 所示。$\mathbf{Z}_{th}$ 的计算如下：

$$\mathbf{Z}_{th} = \frac{(R\angle 0^\circ)(X_C\angle -90^\circ)}{R - jX_C} = \frac{(10\angle 0^\circ\ \text{k}\Omega)(10\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega)}{10\ \Omega - j10\ \text{k}\Omega}$$

$$= \frac{(10\angle 0^\circ\ \text{k}\Omega)(10\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega)}{14.1\angle -45^\circ\ \text{k}\Omega} = \mathbf{7.07\angle -45^\circ\ k\Omega}$$

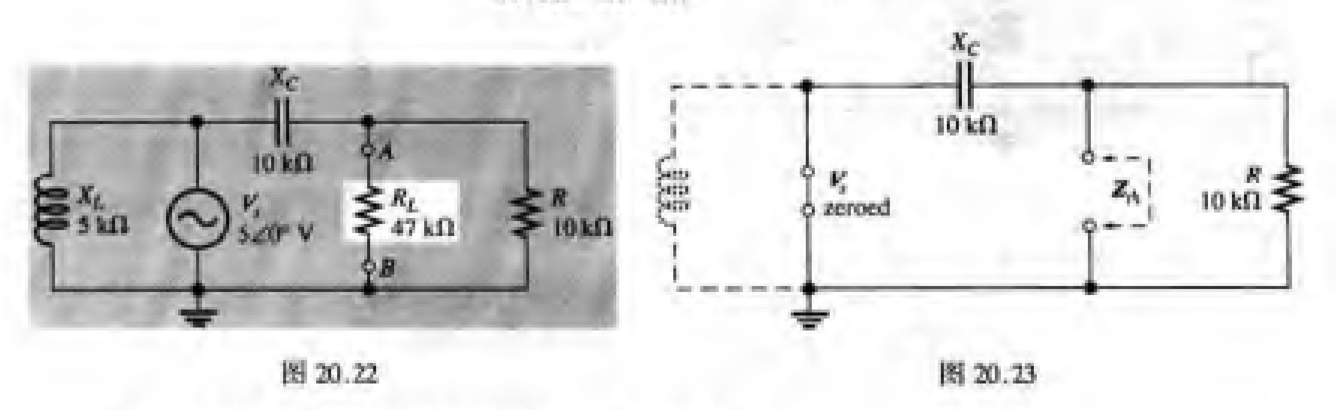


图 20.22 图 20.23

练习：如果在图 20.22 中的 R 为 22 kΩ，R_L 为 39 kΩ，求 $\mathbf{Z}_{th}$。

20.2.4　戴维南等效电路

前面的例题说明了如何计算戴维南等效电路的两个等效部分 $\mathbf{V}_{th}$ 和 $\mathbf{Z}_{th}$。要记住任何电路的 $\mathbf{V}_{th}$ 和 $\mathbf{Z}_{th}$ 都是可以求得的。这两个部分求出后，必须串联起来构成戴维南等效电路。下面就以前面的例题说明如何进行最后一步。

例 20.10　画出图 20.24 中除去 R_L 后电路的戴维南等效电路。此电路在例 20.4 和例 20.7 中都用到过。

解：分别从例 20.4 和例 20.7 中得到 $\mathbf{V}_{th}=11.2\angle 63.4°$ V 和 $\mathbf{Z}_{th}=44.6\angle 63.4°\ \Omega$。采用直角形式表示，阻抗为：

$$\mathbf{Z}_{th}=20\ \Omega+j40\ \Omega$$

这种形式说明：阻抗为 20 Ω 的电阻和 40 Ω 的感性电抗元件串联。戴维南等效电路如图 20.25 所示。

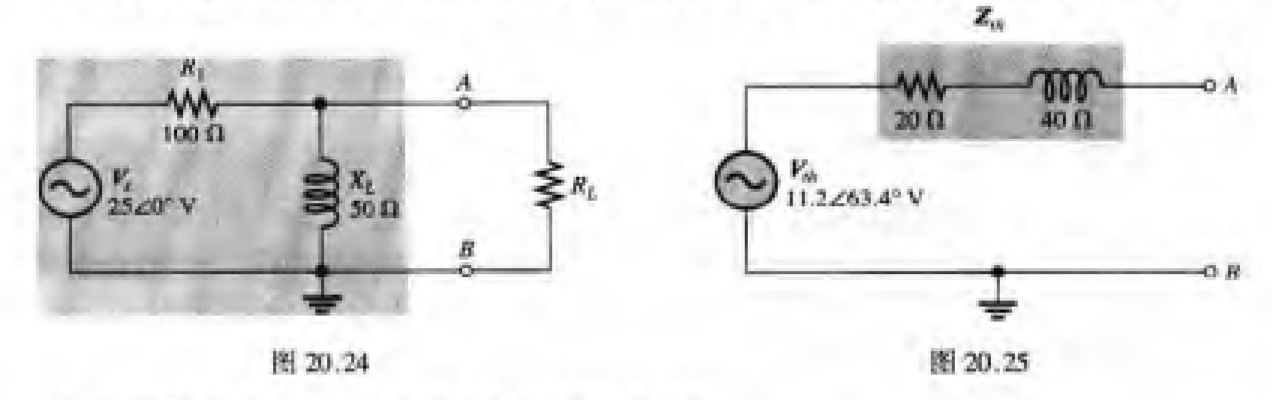


图 20.24　　图 20.25

练习：图 20.24 中的 $R_1=47\ \Omega$，画出其戴维南等效电路。

例 20.11　对于图 20.26 中的电路，画出除去 R_L 后的戴维南等效电路。此电路在例 20.5 和例 20.8 都曾经用到过。

解：从例 20.5 和例 20.8 分别得到 $\mathbf{V}_{th}=4.75\angle -18.4°$ V 和 $\mathbf{Z}_{th}=1138\angle -46.4°\ \Omega$。用直角形式表示阻抗：

$$\mathbf{Z}_{th}=785\ \Omega-j824\ \Omega$$

戴维南等效电路如图 20.27 所示。

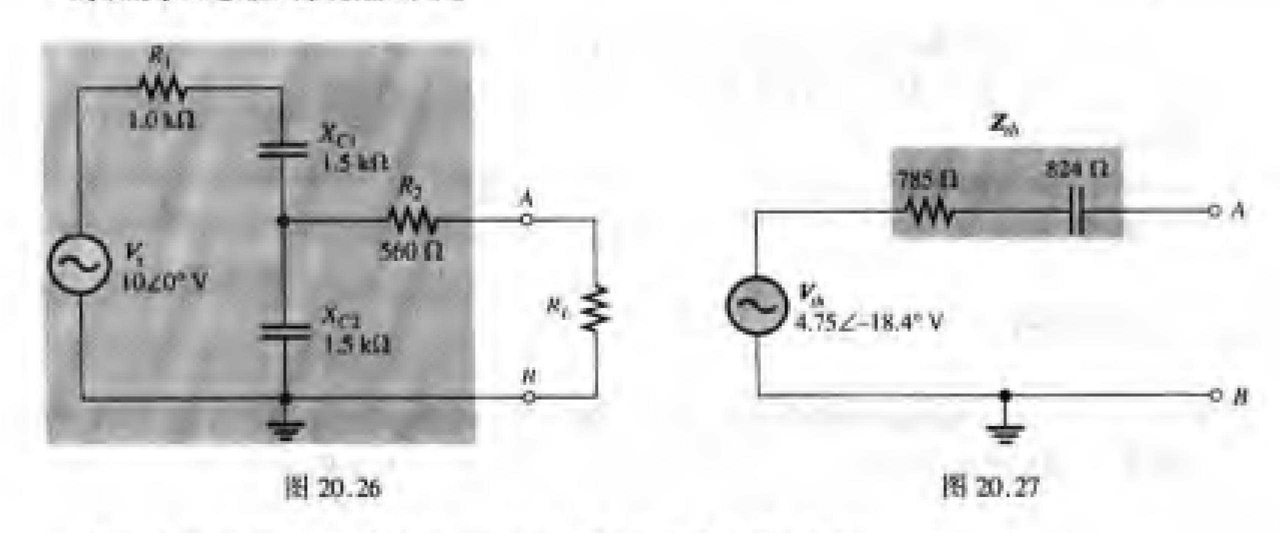


图 20.26　　图 20.27

练习：图 20.26 所示电路中的 $R_1=2.2\ \text{k}\Omega$，画出其戴维南等效电路。

例 20.12　对于图 20.28 中的电路，求出从 R_L 看进去电路的戴维南等效电路。这是例 20.6 和例 20.9 中的电路。

解:从例 20.6 和例 20.9 分别得到 $V_{th} = 3.54\angle 45° \text{ V}$ 和 $Z_{th} = 7.07\angle -45° \text{ k}\Omega$。其阻抗的直角坐标形式为:

$$Z_{th} = 5\ \text{k}\Omega - j5\ \text{k}\Omega$$

戴维南等效电路如图 20.29 所示。

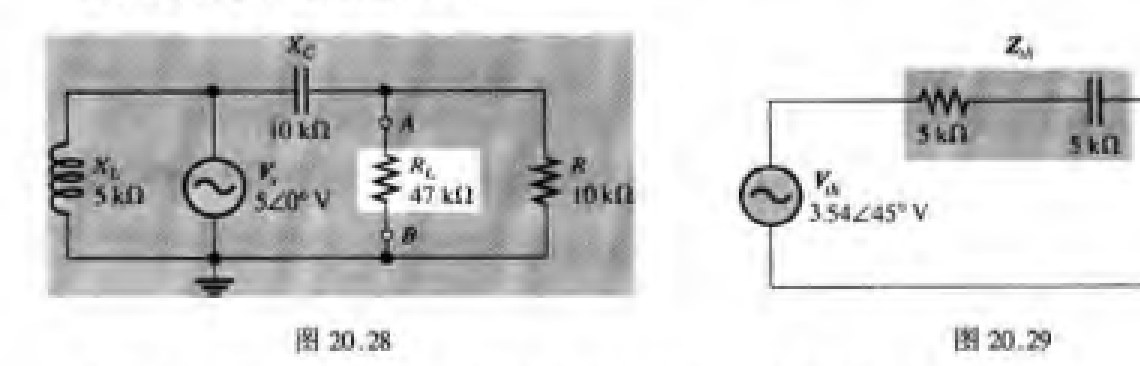


图 20.28　　　　图 20.29

练习:如果图 20.28 中的 R 变为 22 kΩ,R_L 变为 39 kΩ,画出戴维南等效电路。

20.2.5 戴维南定理的总结

要记住:无论戴维南等效电路所代替的原始电路是什么样的,总是一个电压源同一个阻抗的串联。戴维南定理的意义在于,就任何外部负载而言,等效电路可以代替原始电路。任何连接在戴维南等效电路输出端的负载,同连接到原始电路输出端时,其上的电流和电压都是相同的。

运用戴维南定理的步骤总结如下:

第一步 将希望化简为戴维南等效电路的电路输出端开路。这是通过将观察端的元件从电路中去掉实现的。

第二步 求电路的开路电压。

第三步 将理想电压源短路,理想电流源开路,得到从开路端看进去电路的等效阻抗。

第四步 将 V_{th} 和 Z_{th} 串联起来构成戴维南等效电路。

20.2 节练习

1. 戴维南交流等效电路的两个基本组成部分是什么?
2. 对于某一电路,$Z_{th} = 25\ \Omega - j50\ \Omega$,$V_{th} = 5\angle 0° \text{ V}$。画出戴维南等效电路。
3. 对于图 20.30 中的电路,求出从 A 和 B 端看进去电路的戴维南等效电路。

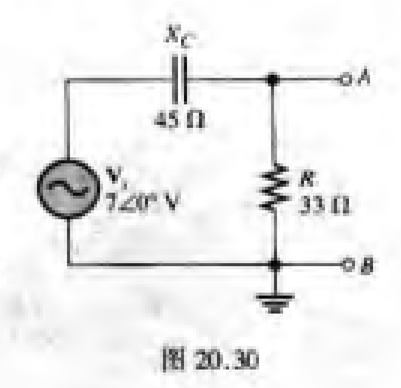


图 20.30

20.3 诺顿定理

像戴维南定理一样,诺顿定理提供了将复杂电路化简成简单、易于处理的方法,以便于分析。二者最基本的区别在于,诺顿定理给出的是等效电流源(而不是电压源)同等效阻抗的并联。

学习完本节后,读者应该能够:

- 应用诺顿定理化简交流阻抗电路
- 描述诺顿等效电路的形式

- 求解诺顿等效交流电流源
- 求解诺顿等效阻抗

诺顿等效电路的形式如图 20.31 所示。无论原始电路多么复杂，都可以化简为这种等效形式。等效电流源命名为 $\mathbf{I}_n$，等效阻抗命名为 $\mathbf{Z}_n$（小写斜体下标代表交流量）。

诺顿定理说明了如何求出 $\mathbf{I}_n$ 和 $\mathbf{Z}_n$。一旦二者已知，将其并联起来就得到完整的诺顿等效电路。

图 20.31　诺顿等效电路

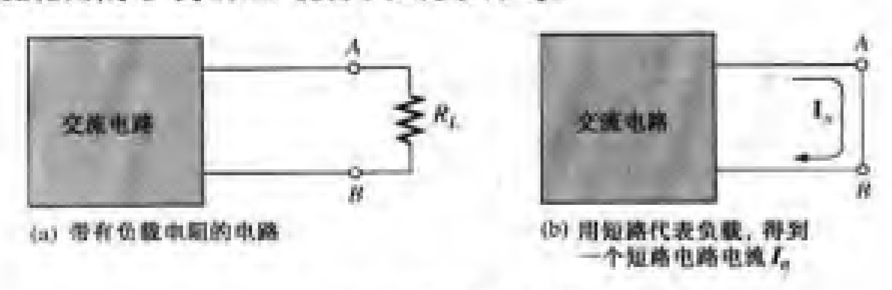
20.3.1　诺顿等效电流源（$\mathbf{I}_n$）

$\mathbf{I}_n$ 是诺顿等效电路的一部分，$\mathbf{Z}_n$ 是另一部分。

诺顿等效电流源定义为：给定电路中两确定端间的短路电流。

任意连接于这两端间的负载，向网络内看是电流源 $\mathbf{I}_n$ 和阻抗 $\mathbf{Z}_n$ 并联。

为了举例说明，假设图 20.32 中的电路有一个连接到 A 和 B 端的电阻负载，如图 20.32(a)所示，希望找出除去 R_L 的电路的诺顿等效电路。为了找出 $\mathbf{I}_n$，将 A 和 B 端短路并计算其间的电流，如图 20.32(b)所示。例 20.13 说明了如何求得 $\mathbf{I}_n$。



(a) 带有负载电阻的电路　　(b) 用短路代表负载，得到一个短路电路电流 $\mathbf{I}_n$

图 20.32　求得 $\mathbf{I}_n$ 的方法

例 20.13　图 20.33 中，求由负载电阻看进去的电路的 $\mathbf{I}_n$。浅色区域是需要诺顿化的电路部分。

解： 将图 20.34 中的 A 和 B 端短路。

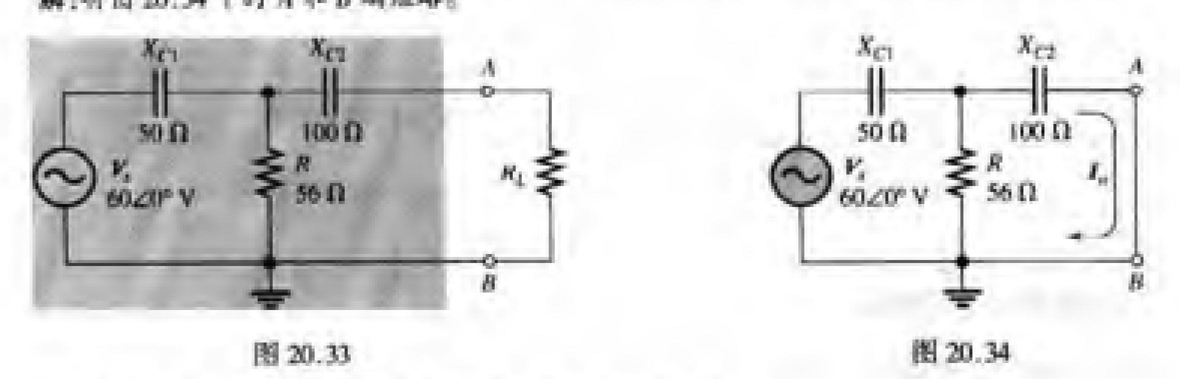


图 20.33　　　图 20.34

$\mathbf{I}_n$ 是短路电流，计算如下。首先，从电源看进去的总阻抗是：

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X}_{C1} + \frac{\mathbf{R}\mathbf{X}_{C2}}{\mathbf{R} + \mathbf{X}_{C2}} = 50\angle -90^\circ\ \Omega + \frac{(56\angle 0^\circ\ \Omega)(100\angle -90^\circ\ \Omega)}{56\ \Omega - j100\ \Omega}$$
$$= 50\angle -90^\circ\ \Omega + 48.9\angle -29.3^\circ\ \Omega$$
$$= -j50\ \Omega + 42.6\ \Omega - j23.9\ \Omega = 42.6\ \Omega - j73.9\ \Omega$$

转换为极坐标形式是：

$$\mathbf{Z} = 85.3\angle -60.0^\circ\ \Omega$$

从电源流出的总电流为：

$$I_s = \frac{V_s}{Z} = \frac{60\angle 0° \text{ V}}{85.3\angle -60.0° \ \Omega} = 703\angle 60.0° \text{ mA}$$

最后，应用分流公式求出 I_n(通过 A 和 B 端的短路电流)：

$$I_n = \left(\frac{R}{R + X_{C2}}\right)I_s = \left(\frac{56\angle 0° \ \Omega}{56 \ \Omega - j100 \ \Omega}\right)703\angle 60.0° \text{ mA} = \mathbf{344\angle 121° \text{ mA}}$$

这是诺顿等效电流源的值。

练习：在图 20.33 中，如果 V_s 变为 25∠0° V，R 变为 33 Ω，确定 I_n。

20.3.2 诺顿等效阻抗(Z_n)

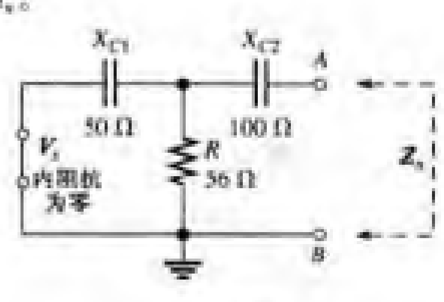


图 20.35

Z_n 的定义与 Z_{th} 相同：给定电路中，将所有电源用其内阻抗代替后从开路端看进去的电路总阻抗。

例 20.14 计算图 20.33(参见例 20.13)中从开路端 A 和 B 看进去的电路的 Z_n。

解：首先将 V_s 用其内阻抗(零)代替，如图 20.35 所示。

从 A 和 B 端看进去，R 和 C_1 先并联组合再和 C_2 串联，所以：

$$\begin{aligned}Z_n &= X_{C2} + \frac{RX_{C1}}{R + X_{C1}} = 100\angle -90° \ \Omega + \frac{(56\angle 0° \ \Omega)(50\angle -90° \ \Omega)}{56 \ \Omega - j50 \ \Omega} \\ &= 100\angle -90° \ \Omega + 37.3\angle -48.2° \ \Omega \\ &= -j100 \ \Omega + 24.8 \ \Omega - j27.8 \ \Omega = \mathbf{24.8 \ \Omega - j128 \ \Omega}\end{aligned}$$

诺顿等效阻抗为 24.8 Ω 的电阻与 128 Ω 的容性电抗串联。

练习：图 20.33 中，如果 V_s = 25∠0° V，R = 33 Ω，求 Z_n。

以上两道例题说明了如何求出诺顿等效电路的两个等效部分。要注意对任意给定的交流电路都可以得到这些值。一旦这些值已知，将其并联起来形成诺顿等效电路，如下例所示。

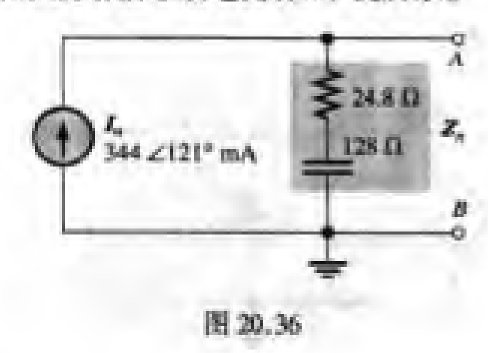


图 20.36

例 20.15 画出图 20.33 中所示电路完整的诺顿等效电路(参见例 20.13)。

解：由例 20.13 和例 20.14 分别可知，I_n = 344∠121° mA 和 Z_n = 24.8 Ω − j128 Ω。诺顿等效电路如图 20.36 所示。

练习：在图 20.33 中，如果 V_s = 25∠0° V，R = 33 Ω，给出其诺顿等效电路。

20.3.3 诺顿定理的总结

任何接在诺顿等效电路输出端的负载，其上的电流、电压同接在原始电路时是相同的。在理论上应用诺顿定理的步骤总结如下：

第一步 将需要求解诺顿等效电路两输出端上的负载用短路代替。

第二步 求短路电流，即 I_n。

第三步 将输出端开路，并将其内部所有电源用它们的内阻抗代替，确定输出端阻抗，即 Z_n。

第四步 将 I_n 和 Z_n 并联。

20.3 节练习

1. 对于给定电路，$I_n = 5\angle 0°$ mA，$Z_n = 150\ \Omega + j100\ \Omega$，画出其诺顿等效电路。
2. 画出图 20.37 中由 R_L 看进去的诺顿等效电路。

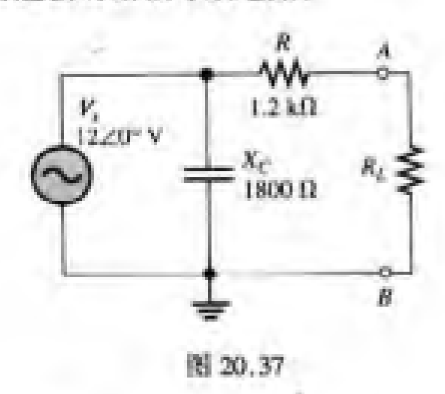


图 20.37

20.4　最大功率传递定理

负载阻抗是电路输出阻抗的复共轭时，负载获得最大功率。

学习完本章后，读者应该能够：

- 运用最大功率传递定理
- 解释该定理
- 对于一给定电路，确定最大功率得到传递时的负载阻抗

$R - jX_C$ 的复共轭是 $R + jX_L$，在幅值上二者的电阻和电抗值是相等的。输出阻抗实际上是从输出端看进去电路的戴维南等效阻抗。Z_L 是 Z_{out} 的复共轭时，负载从电路获得了最大输出功率，此时功率因数为 1。带有输出阻抗和负载的等效电路如图 20.38 所示。

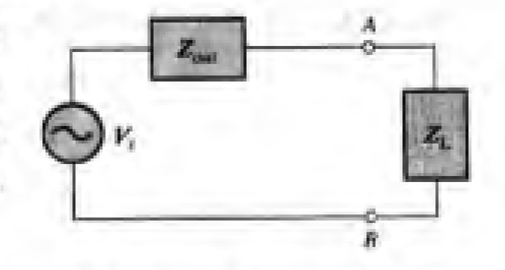


图 20.38　带有负载的等效电路

例 20.16 描述了阻抗共轭匹配时出现的最大功率传输。

例 20.16　图 20.39 中 A 和 B 端左边的电路为负载 Z_L 提供了功率，可将此看做仿真一个功率放大器向复数负载提供功率。这是一个比较复杂电路的戴维南等效。计算在以下频率时电路向负载提供的功率，并画出曲线：10 kHz，30 kHz，50 kHz，80 kHz 和 100 kHz。

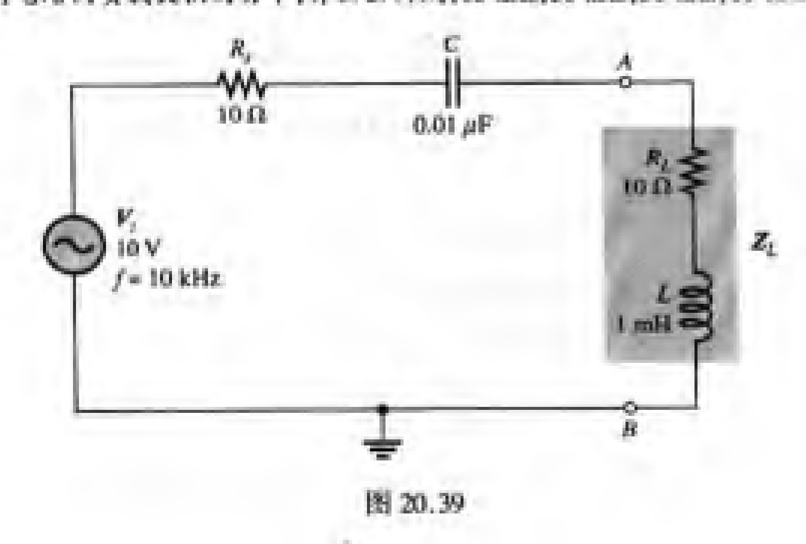


图 20.39

解:当 $f = 10$ kHz 时,

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(10\ \text{kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 1.59\ \text{k}\Omega$$
$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(10\ \text{kHz})(1\ \text{mH}) = 62.8\ \Omega$$

总阻抗的大小为:

$$Z_{tot} = \sqrt{(R_s + R_L)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (1.53\ \text{k}\Omega)^2} = 1.53\ \text{k}\Omega$$

电流为:

$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\ \text{V}}{1.53\ \text{k}\Omega} = 6.54\ \text{mA}$$

负载上的功率为:

$$P_L = I^2R_L = (6.54\ \text{mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{428\ \mu W}$$

当 $f = 30$ kHz 时,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(30\ \text{kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 531\ \Omega$$
$$X_L = 2\pi(30\ \text{kHz})(1\ \text{mH}) = 189\ \Omega$$
$$Z_{tot} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (342\ \Omega)^2} = 343\ \Omega$$
$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\ \text{V}}{343\ \Omega} = 29.2\ \text{mA}$$
$$P_L = I^2R_L = (29.2\ \text{mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{8.53\ mW}$$

当 $f = 50$ kHz 时,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(50\ \text{kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 318\ \Omega$$
$$X_L = 2\pi(50\ \text{kHz})(1\ \text{mH}) = 314\ \Omega$$

要注意,X_C 和 X_L 的值是十分接近的,这使得阻抗近似是复共轭的。使 $X_C = X_L$ 时的精确频率是 50.3 kHz。

$$Z_{tot} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (4\ \Omega)^2} = 20.4\ \Omega$$
$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\ \text{V}}{20.4\ \Omega} = 490\ \text{mA}$$
$$P_L = I^2R_L = (490\ \text{mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{2.40\ W}$$

当 $f = 80$ kHz 时,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(80\ \text{kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 199\ \Omega$$
$$X_L = 2\pi(80\ \text{kHz})(1\ \text{mH}) = 503\ \Omega$$
$$Z_{tot} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (304\ \Omega)^2} = 305\ \Omega$$
$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\ \text{V}}{305\ \Omega} = 32.8\ \text{mA}$$
$$P_L = I^2R_L = (32.8\ \text{mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{10.8\ mW}$$

当 $f = 100$ kHz 时,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(100\ \text{kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 159\ \Omega$$
$$X_L = 2\pi(100\ \text{kHz})(1\ \text{mH}) = 628\ \Omega$$
$$Z_{tot} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (469\ \Omega)^2} = 469\ \Omega$$
$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\ \text{V}}{469\ \Omega} = 21.3\ \text{mA}$$
$$P_L = I^2R_L = (21.3\ \text{mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{4.54\ mW}$$

正如所看到的，负载获得的功率峰值出现在频率等于 50 kHz 这一点上。在此点上，负载阻抗同输出阻抗复共轭匹配（当二者电抗的幅值相等时）。负载的功率随频率变化的曲线如图 20.40 所示。由于最大功率比其他值大得多，在缺少中间值时，很难得到精确的曲线。

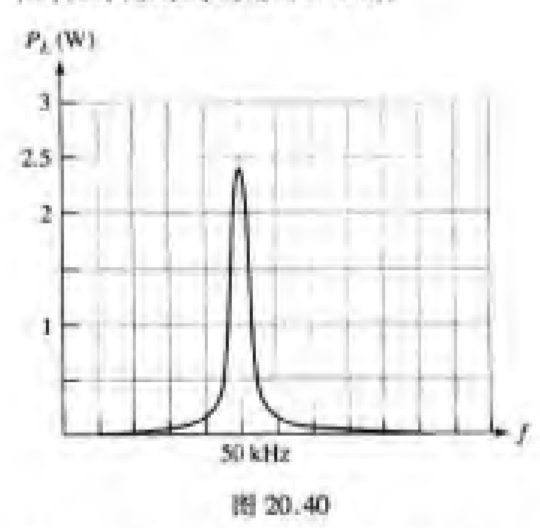


图 20.40

练习：在 RC 串联电路中，如果 $R = 47\ \Omega$，$C = 0.022\ \mu F$，当频率为 100 kHz 时阻抗的复共轭是多少？

例 20.17　(a) 在图 20.41(a) 中，求出由放大器向扬声器传送最大功率时的频率。放大器和耦合电容是电源，扬声器是负载，如图 20.41(b) 中的等效电路所示。

(b) 在此频率下，如果 $V_s = 3.8$ V rms，则扬声器获得多大功率？

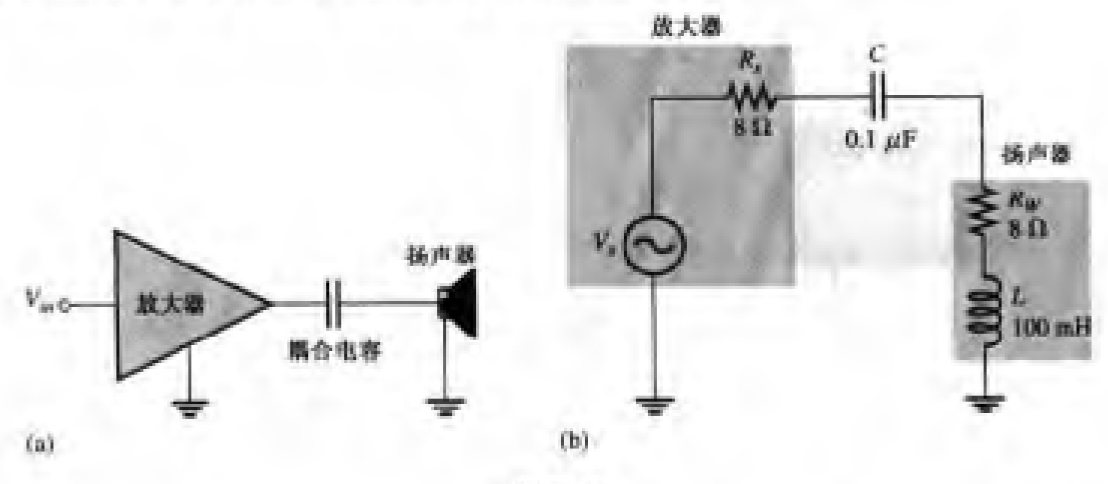


图 20.41

解：(a) 当扬简获得最大功率时，电源阻抗 $(R_s - jX_C)$ 与负载阻抗 $(R_W + jX_L)$ 是共轭匹配的，所以：

$$X_C = X_L$$

$$\frac{1}{2\pi fC} = 2\pi fL$$

解出 f，

$$f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(100\ \text{mH})(0.1\ \mu\text{F})}} \cong \mathbf{1.59\ kHz}$$

(b) 扬声器获得的功率计算如下:

$$Z_{tot} = R_s + R_W = 8\ \Omega + 8\ \Omega = 16\ \Omega$$

$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{3.8\ \text{V}}{16\ \Omega} = 238\ \text{mA}$$

$$P_{max} = I^2R_W = (238\ \text{mA})^2(8\ \Omega) = \mathbf{453\ mW}$$

练习:图 20.41 中耦合电容为 1 μF,试求频率为多少时,扬声器从放大器获得最大功率?

20.4 节练习

1. 如果某一驱动电路的输出阻抗是 50 Ω − j10 Ω,为了向负载提供最大功率,则负载阻抗是多少?
2. 对于第 1 题中的电路,当负载阻抗同输出阻抗共轭匹配且负载电流为 2 A 时,电路向负载传递的功率是多少?

技术实践

在本技术实践中,将给出一个取自某系统中已封装的带通滤波器以及带通滤波器的原理图。图中均表示该带通滤波器是由一个低通/高通滤波器的组合实现的。两幅图中肯定有一个对应滤波器模块,至于是哪一幅图并不确定。通过某些测量,可以确定哪一幅图是对应该滤波器的,以便再造滤波器电路。而且,也要确定最大功率传递时所需的负载。滤波器电路含有一个已封装的模块和两幅图,其中一幅图对应该滤波器,如图 20.42 所示。

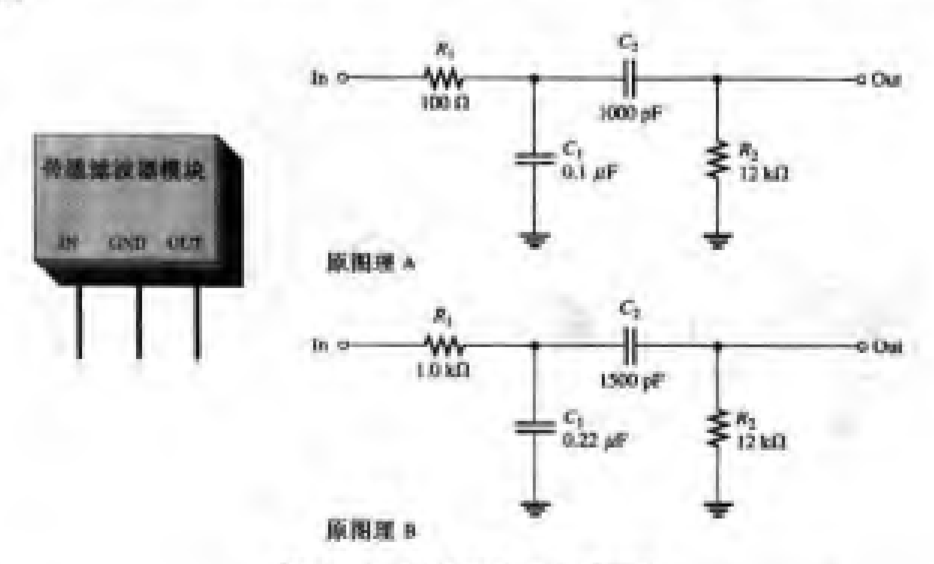


图 20.42 滤波器模块及原理图

滤波器测量及分析

- 如图 20.43 所示,基于示波器对滤波器输出的测量,确定图 20.42 中的哪一幅图代表该模块中滤波器电路的参数,将峰-峰值为 10 V 的电压加到电路的输入端。
- 如图 20.43 所示,基于示波器的测量,确定滤波器是否工作于合适的中心频率。
- 将负载连接到滤波器的输出端,应用戴维南定理,在中心频率下求获得最大功率传输时所需的负载阻抗。假设电源内阻抗为零。

技术实践练习

1. 求图 20.42 中并非模块内的电路在图 20.43 所示频率下的峰-峰值输出电压。
2. 求图 20.42 中并非模块内的电路的中心频率。



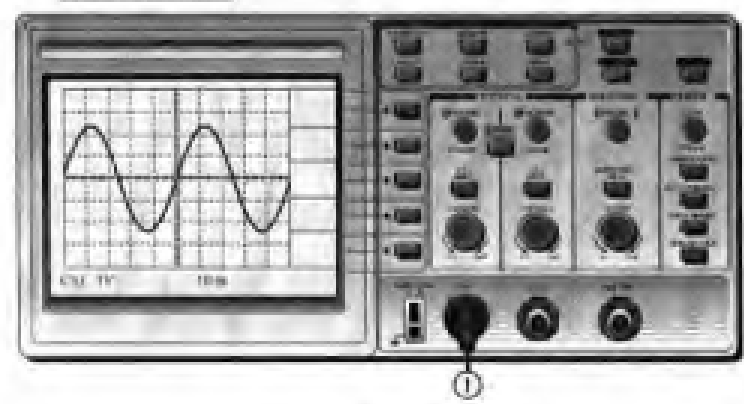


图 20.43

小结

- 叠加定理对交流和直流多电源电路的分析是很有用的。
- 戴维南定理提供了将任何交流电路化简为由等效电压源和等效阻抗串联构成的等效电路的方法。
- 正如等效的概念用在戴维南和诺顿定理中，意味着任何给定负载阻抗连接到等效电路上时，与连接到原电路上时这两种情况下，其两端的电压和电流是相同的。
- 诺顿定理提供了将任何交流电路化简为由等效电流源和等效阻抗并联构成的等效电路的方法。
- 负载阻抗与驱动电路阻抗共轭匹配时，负载获得最大功率。

主要术语

复共轭：具有与给定阻抗电阻分量相同、电抗分量相位相反的阻抗，二者在幅值上相同。

等效电路：对于给定负载，可以提供与原电路有相同电压和电流的电路。

诺顿定理：一种将双端口电路化简为由电流源和等效阻抗并联构成的等效电路的方法。

叠加定理：分析具有一个以上电源电路的方法。

戴维南定理：一种将双端口电路化简为由电压源和等效阻抗串联构成的等效电路的方法。

自测题

1. 在运用叠加定理时，
   (a) 同时考虑所有电源
   (b) 同时考虑所有电压源
   (c) 一次只考虑一个电源作用，将其他电源短路
   (d) 一次只考虑一个电源作用，将其他电源用其内阻抗代替
2. 戴维南交流等效电路总是包含一个等效交流电压源
   (a) 和一个等效电容　　(b) 和一个等效感性电抗
   (c) 和一个等效阻抗　　(d) 同一个等效容性阻抗串联
3. 一个电路同另一个电路是等效的，当
   (a) 相同负载连接到每个电路时都有相同的电压和电流

(b) 不同负载连接到每个电路时都有相同的电压和电流
(c) 两电路有相同的电压源和相同的串联阻抗
(d) 两电路有相同的输出电压

4. 戴维南等效电压是:
(a) 开路电压　　(b) 短路电压
(c) 等效负载两端的电压　　(d) 以上都不是

5. 戴维南等效阻抗是从哪两端看进去的阻抗?
(a) 输出短路时,从电源
(b) 输出开路时,从电源
(c) 当所有电源由其内阻抗代替时,从任意两个指定开路端口
(d) 当所有电源短路时,从任意两个指定开路端口

6. 诺顿交流等效电路总是由以下哪部分组成的?
(a) 等效交流电流源串联等效阻抗
(b) 等效交流电流源并联等效电抗
(c) 等效交流电流源并联等效阻抗
(d) 等效交流电压源并联等效阻抗

7. 诺顿等效电流是:
(a) 从电源流出的总电流　　(b) 短路电流
(c) 流向等效负载的电流　　(d) 以上都不是

8. $50\ \Omega + j100\ \Omega$ 的复共轭是:
(a) $50\ \Omega - j50\ \Omega$　　(b) $100\ \Omega + j50\ \Omega$
(c) $100\ \Omega - j50\ \Omega$　　(d) $50\ \Omega - j100\ \Omega$

9. 为了从容性电源得到最大功率传输,负载必须:
(a) 具有与电源电容相等的电容
(b) 幅值上等于电源阻抗
(c) 感性的
(d) 与电源阻抗是复共轭的
(e) 答案(a)和(d)

故障检修测验

参见图 20.47

1. 如果直流电源短路,那么以地作为参考 A 点的电压为:
(a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

2. 如果 C_2 开路,R_5 两端的电压将:
(a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

3. 如果 C_2 开路,R_5 两端的直流电压将:
(a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

参见图 20.49(c)

4. 如果 V_2 减小为 0 V,R_L 两端的电压将:
(a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

5. 如果电压源的频率增大,经过 R_L 的电流将:
(a) 增大　(b)减小　(c) 不变

参见图 20.50

6. 如果电压源的频率增大，R_1 两端的电压将：

   (a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

7. 如果 R_L 开路，两端的电压将：

   (a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

参见图 20.51

8. 如果电源的频率增大，R_3 两端的电压将：

   (a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

9. 如果电容值减小，电源输出电流将：

   (a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

参见图 20.54

10. 如果 R_2 开路，电流源电流将：

    (a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

11. 如果电压源的频率增大，X_{C2} 将：

    (a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

12. 如果去掉负载，R_3 两端的电压将：

    (a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

13. 如果去掉负载，R_2 两端的电压将：

    (a) 增大　(b) 减小　(c) 不变

习题(标有 * 的习题难度较大，奇数序号的习题答案在本书末尾)

20.1 节　叠加定理

1. 运用叠加方法，计算图 20.44 中流经 R_3 的电流。
2. 运用叠加定理，求图 20.44 中 R_3 支路的电流和电压。
3. 运用叠加定理，求图 20.45 中流经 R_1 的电流。

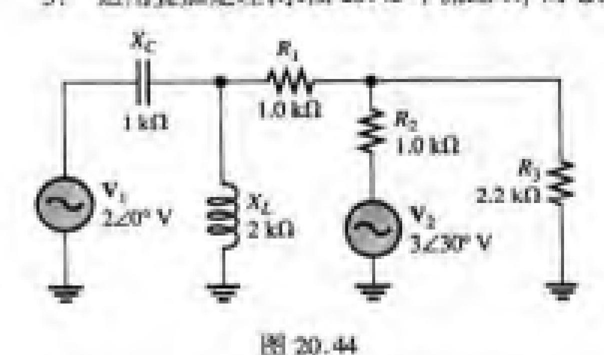


图 20.44

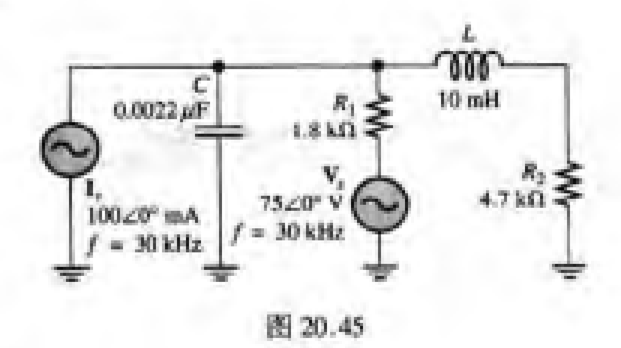


图 20.45

4. 运用叠加定理，求图 20.46 所示每个电路中流经 R_L 的电流。

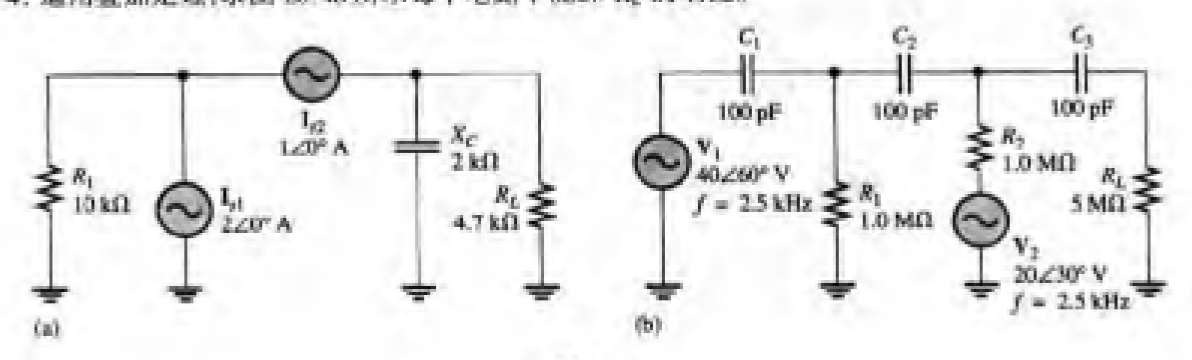


图 20.46

* 5. 求图 20.47 中每个点(A, B, C, D)的电压。假设所有电容为 $X_C = 0$,绘制每个点的电压波形。

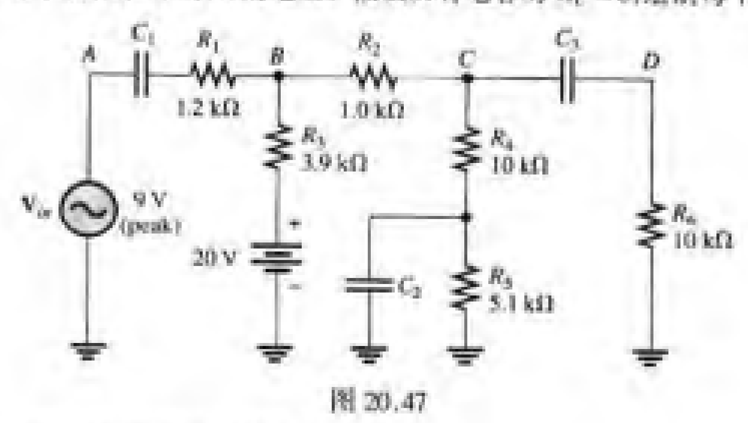


图 20.47

* 6. 运用叠加定理,求图 20.48 中电容的电流。

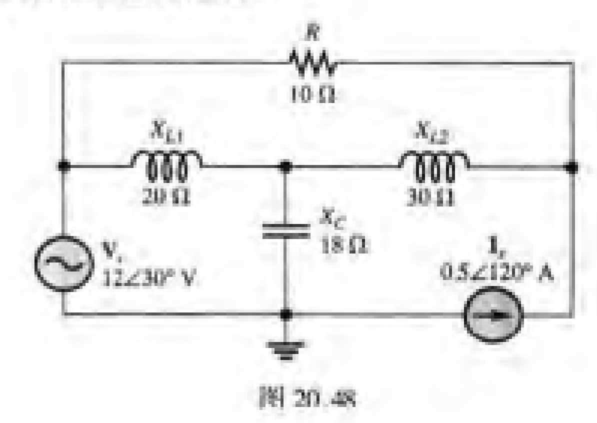


图 20.48

20.2 节 戴维南定理

7. 对于图 20.49 中的每个电路,确定由 R_L 看进去电路的戴维南等效电路。

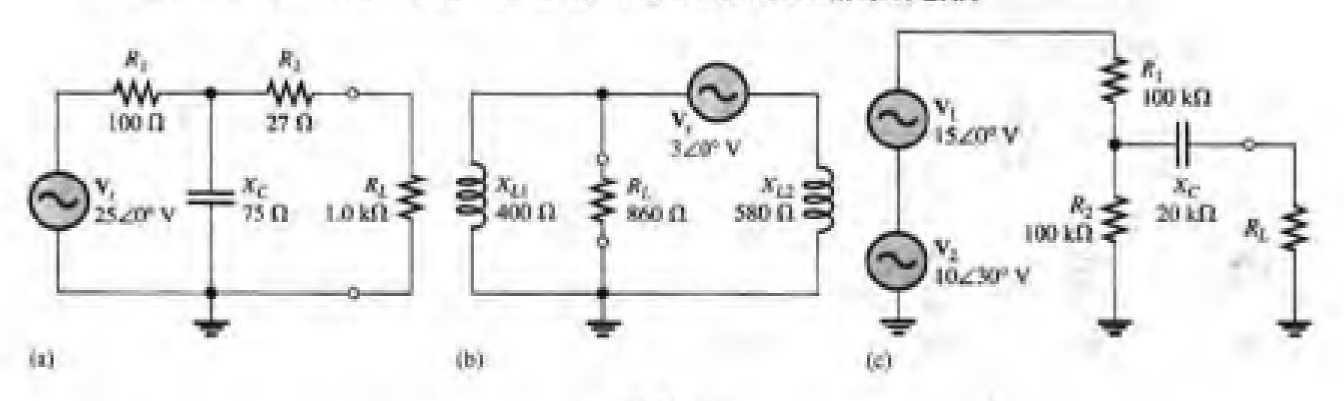


图 20.49

8. 运用戴维南定理,求图 20.50 中流经负载 R_L 的电流。

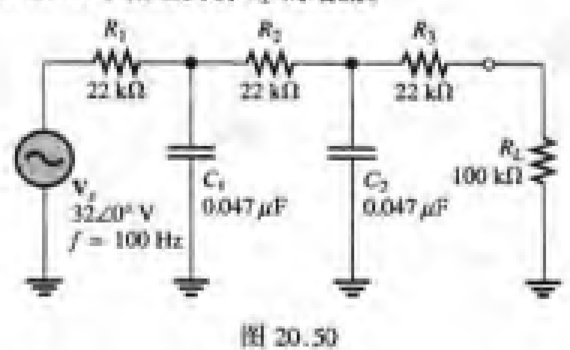


图 20.50

*9. 运用戴维南定理，求图 20.51 中 R_4 两端的电压。

*10. 对于图 20.52，将 R_3 以外的部分化简为戴维南等效电路。

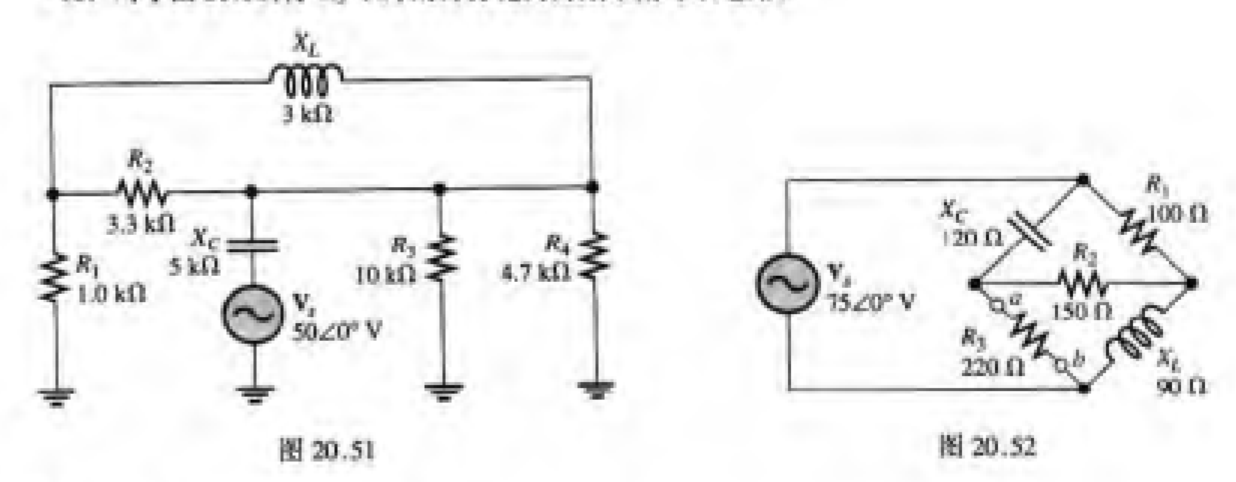


图 20.51　　　　图 20.52

20.3 节　诺顿定理

11. 对于图 20.49 中的每一个电路，确定由 R_L 看进去的诺顿等效电路。

12. 运用诺顿定理，求图 20.50 中负载电阻 R_L 的电流。

*13. 运用诺顿定理，求图 20.51 中 R_4 两端的电压。

20.4 节　最大功率传递定理

14. 对于图 20.53 中的每一个电路，最大功率传输到负载 R_L。试求每个电路中合适的负载阻抗值。

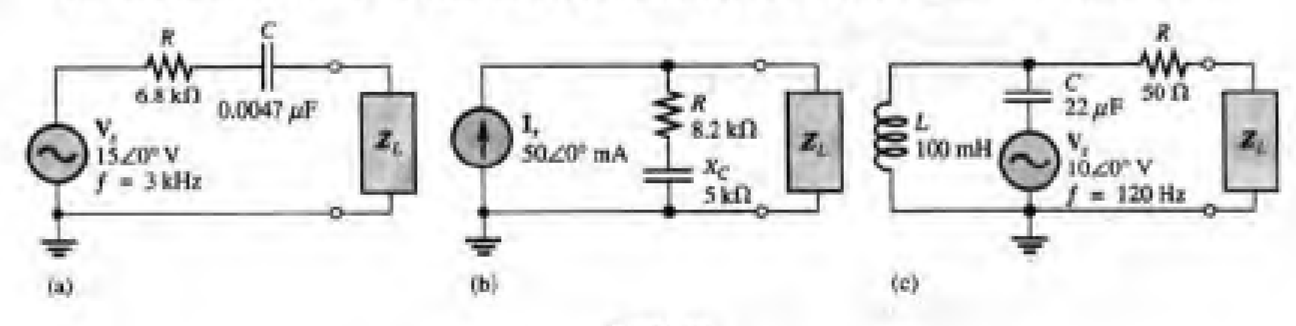


图 20.53

*15. 求图 20.54 中负载获得最大功率时的 $\mathbf{Z}_L$。

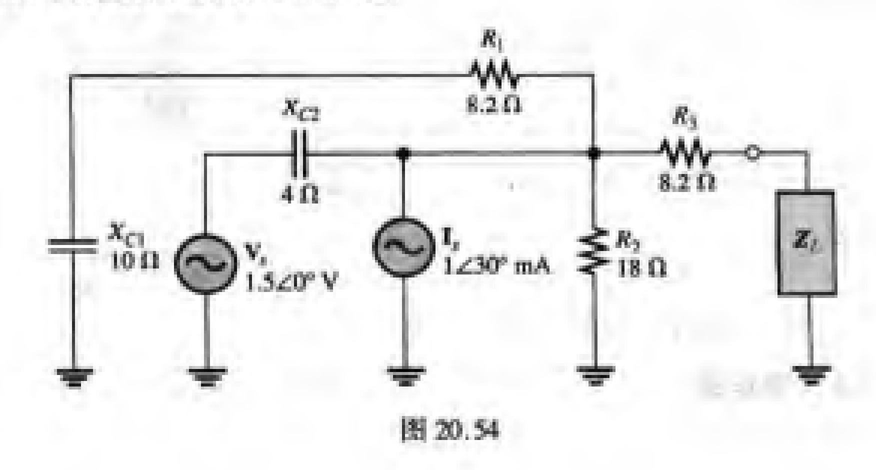


图 20.54

*16. 求图 20.55 中负载获得最大功率时的 Z_L,并求最大功率。

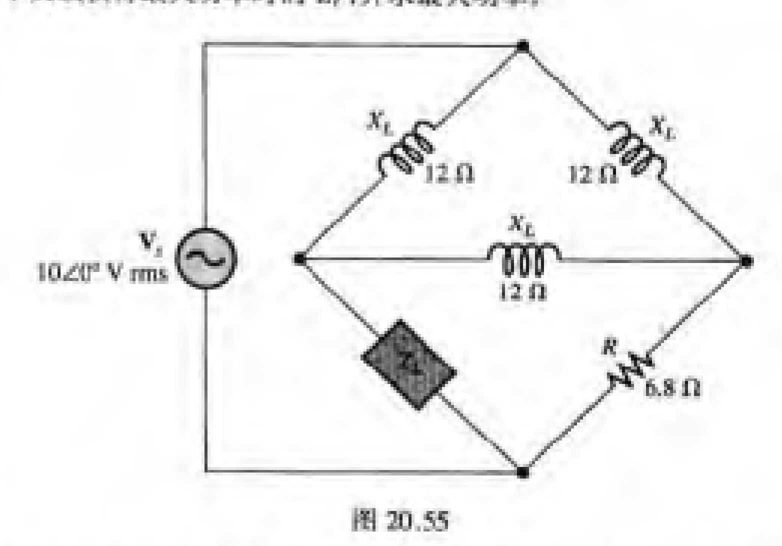


图 20.55

*17. 图 20.52 中,为了获得最大功率传输,R_2 位置需连一负载。确定该负载类型,并用直角坐标形式表示。

EWB/Multisim 故障检修

这些习题需要使用本书附带的 EWB/Multisim 光盘。

18. 打开文件 P20.18 确定是否有错误。如果有,请指出。
19. 打开文件 P20.19 确定是否有错误。如果有,请指出。
20. 打开文件 P20.20 确定是否有错误。如果有,请指出。
21. 打开文件 P20.21 确定是否有错误。如果有,请指出。
22. 打开文件 P20.22,通过测量确定从 A 点看进去的戴维南等效电路。
23. 打开文件 P20.23,通过测量确定从 A 点看进去的诺顿等效电路。

答案

20.1 节 叠加理论

1. 网络电流为零。
2. 分析电路时,可利用叠加定理,一次只让一个电源起作用。
3. $I_R = 12$ mA

20.2 节 戴维南定理

1. 戴维南交流等效电路的组成为等效电压源串联等效阻抗。
2. 参见图 20.56。
3. $\mathbf{Z}_{th} = 21.5\ \Omega - j15.7\ \Omega$; $\mathbf{V}_{th} = 4.14\angle 53.8°$ V。

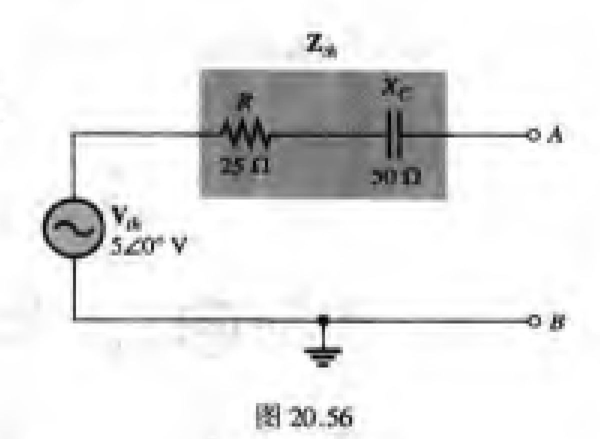


图 20.56

20.3 节 诺顿定理

1. 参见图 20.57。
2. $\mathbf{Z}_n = R\angle 0° = 1.2\angle 0°$ kΩ; $\mathbf{I}_n = 10\angle 0°$ mA。

20.4 节 最大功率传递定理

1. $\mathbf{Z}_L = 50\ \Omega + j10\ \Omega$
2. $P_L = 200$ W

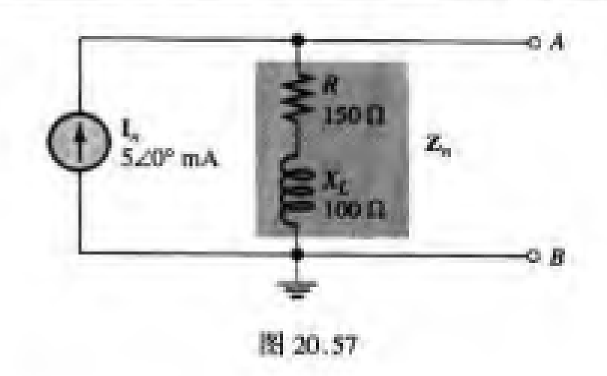


图 20.57

技术实践

1. V_{out} = 166∠ - 66.1° mV pp
2. f_0 = 4.76 kHz

实例相关练习

20.1　2.11∠ - 153° mA
20.2　30∠90° mA
20.3　1.69∠47.3° mA,加载于 3 mA 直流分量上。
20.4　18.2∠43.2° V
20.5　4.03∠ - 36.3° V
20.6　4.55∠24.4° V
20.7　34.3∠43.2° Ω
20.8　1.37∠ - 47.8° kΩ
20.9　9.10∠ - 65.6° kΩ
20.10　参见图 20.58。
20.11　参见图 20.59。

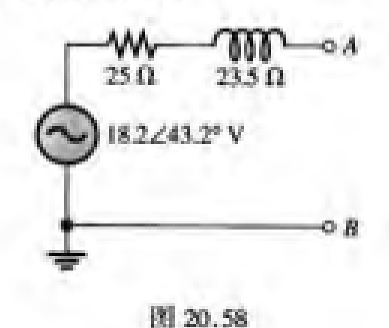


图 20.58

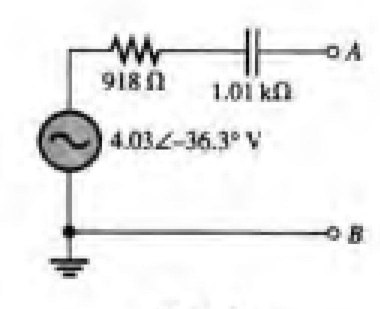


图 20.59

20.12　参见图 20.60。

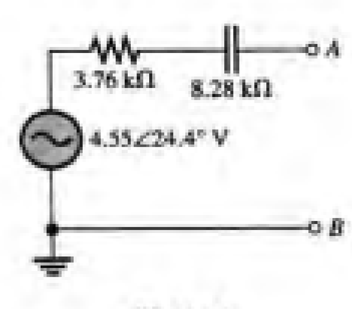


图 20.60

20.13 117∠135° mA

20.14 117∠−78.7° Ω

20.15 参见图 20.61。

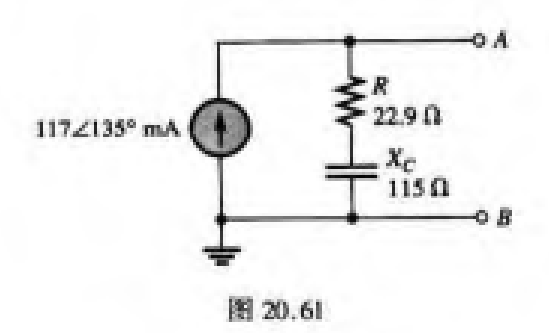


图 20.61

20.16 47 Ω + j72.3 Ω

20.17 503 Hz

自测题

1.(d)　2.(c)　3.(a)　4.(a)　5.(c)　6.(c)　7.(b)　8.(d)　9.(d)

习题

1.(c)　2.(a)　3.(c)　4.(b)　5.(a)　6.(a)　7.(a)　8.(a)

9.(b)　10.(c)　11.(b)　12.(b)　13.(a)

第 21 章　电抗电路的脉冲响应

引言

在第 16 章和第 17 章中，分别介绍了 *RC* 和 *RL* 电路的频率响应。本章，将探讨 *RC* 和 *RL* 电路对脉冲输入的响应。在学习本章之前，请先回顾 13.5 节和 14.5 节的内容。理解电容和电感中的电压和电流的指数变化，对于学习脉冲响应有很重要的作用。本章的学习，将应用到第 13 章和第 14 章中给出的指数公式。

脉冲波形输入时，电路的时间响应是很重要的。在脉冲和数字电路领域中，工程师更关心的通常是电路如何响应，而不是电压或电流跳变的间隔时间。电路的时间常数和输入脉冲特性比如脉冲宽度和周期等之间的关系，决定了电路中电压波形的形状。贯穿本章的主要术语——积分器和微分器，是指在某种条件下，由这些电路构成近似的数学函数。数学的积分是一个平均过程，而数学的微分是瞬间变化速率中的建立过程。

本章目标

- 解释 *RC* 积分器的原理
- 分析单脉冲输入的 *RC* 积分器
- 分析序列脉冲输入的 *RC* 积分器
- 分析单脉冲输入的 *RC* 微分器
- 分析序列脉冲输入的 *RC* 微分器
- 分析 *RL* 积分器的原理
- 分析 *RL* 微分器的原理
- 解释时间响应和频率响应之间的关系
- *RC* 积分器和 *RC* 微分器的故障检修

主要术语

- 积分器
- 时间常数
- 脉冲响应
- 暂态时间
- 稳定状态
- 微分器
- 直流分量

技术实践

在技术实践中，要求确定一个延时电路的线路。同时判断每部分的值以符合定值，选择正确测量电路的仪器设备。

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

21.1　*RC* 积分器

根据脉冲响应，经由电容两端输出电压的串联 *RC* 电路称为一个积分器。同时，在频率响应方面，又是一个低通滤波器。积分器的术语源于积分的数学过程，在某种条件下，这种类型的电路近似为积分过程。

学完本节后,读者应该能够:

- 解释 *RC* 积分器的原理
- 描述电容如何充电和放电
- 描述电压或电流瞬间发生变化时,电容的反映
- 描述输出电压的基本波形

21.1.1 输入脉冲时,电容如何充电和放电

脉冲发生器连接到 *RC* 积分器的输入端时,如图 21.1 所示,电容将随着脉冲进行充电和放电。输入从低电平变到高电平时,电容通过电阻在脉冲的高电平进行充电。这个充电过程可看做电源和 *RC* 电路通过一个闭合开关连接,如图 21.2(a)所示。脉冲从高电平变回低电平时,电容通过电源放电。与电阻的阻抗比较,电源的阻抗可忽略不计。这个放电过程可看做用一个闭合开关取代电源,如图 21.2(b)所示。

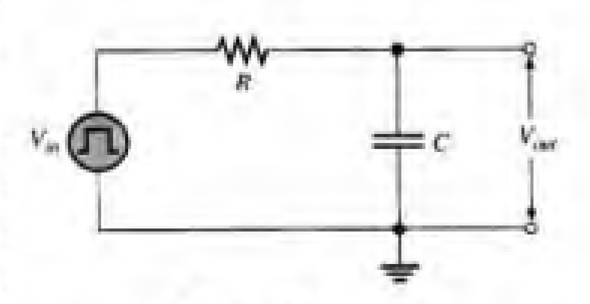
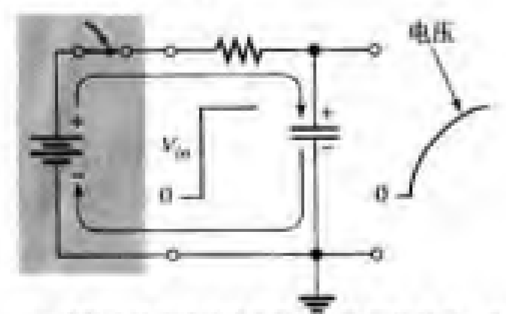
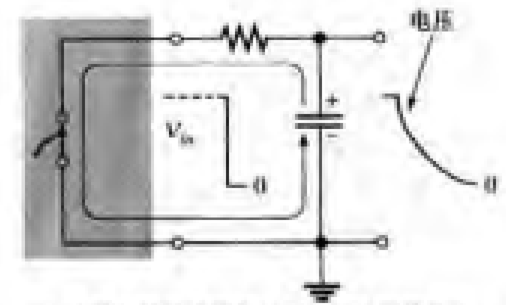


图 21.1 *RC* 积分电路



(a) 当输出脉冲达到高电平时,电源等效于一个电池和一个闭合开关串联,由此电容充电



(b) 当输入脉冲变到低电平时,电源等效于一个闭合开关,从而为电容放电提供了路径

图 21.2 脉冲源对电容充电和放电的等效作用

在第 13 章曾介绍过,电容充电和放电符合一条指数曲线。同时,电容充电和放电的速率取决于 *RC* 的时间常数($\tau = RC$)。

对于一个理想脉冲,两个边缘都视为瞬间跳变的。电容特性的两个基本原则有助于理解 *RC* 电路的脉冲响应。

1. 电流发生瞬间变化时,电容视为短路。同时,电压为直流电压时,电容视为开路。
2. 通过电容的电压不能发生瞬间变化——仅能按指数曲线变化。

21.1.2 电容电压

在 *RC* 积分器中,输出量是电容的电压。在脉冲为高电平的时间内,电容充电。如果脉冲在高电平的时间足够长,电容将完全充电到脉冲的电压幅度,如图 21.3 所示。在脉冲为低电平期间,电容放电。如果两个脉冲之间的低电平时间足够长,电容将完全放电,直到为零,如图 21.3 中所示。接着,下一个脉冲发生时,电容将再一次充电。

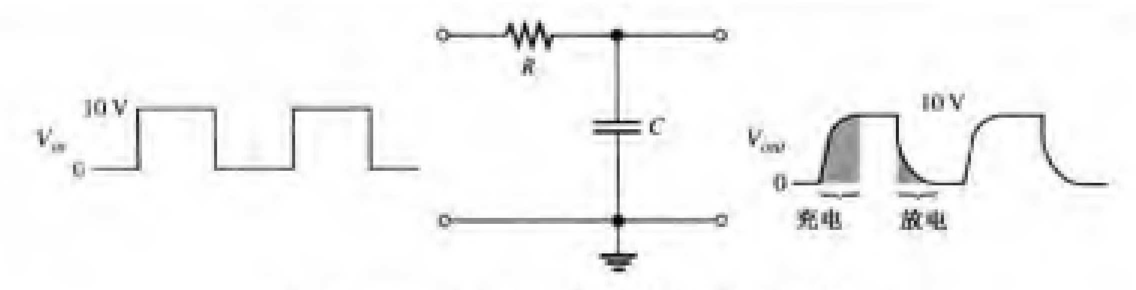


图 21.3　对于脉冲输入，电容完全充电和放电的图例

21.1 节练习

1. 给出 *RC* 电路中积分器术语的定义。
2. *RC* 电路中，促使电容充电和放电的原因是什么?

21.2　*RC* 积分器的单脉冲响应

经过上一节的学习，我们大致了解了 *RC* 积分器对于脉冲输入的响应。在本节中，将详细介绍单脉冲的响应。

学完本节后，读者应该能够：

- 分析单脉冲输入的 *RC* 积分器
- 讨论电路时间常数的重要性
- 定义暂态时间
- 若脉冲宽度等于或者大于五倍的时间常数，判断电路的响应
- 若脉冲宽度小于五倍的时间常数，判断电路的响应

必须考虑到脉冲响应的两种条件：

1. 输入脉冲的宽度(t_W)等于或者大于五倍的时间常数($t_W \geq 5\tau$)
2. 输入脉冲的宽度小于五倍的时间常数($t_W < 5\tau$)

值得注意的是，将五倍的时间常数看做是电容完全充电和完全放电的时间，通常称之为暂态时间。

21.2.1　脉冲宽度等于或者大于五倍的时间常数

如果脉冲宽度等于或者大于五倍的时间常数(5τ)，则电容将完全充电。这种情况表示为 $t_W \geq 5\tau$。在脉冲结束时，电容将通过电源完全放电。

对于不同的 *RC* 时间常数和固定的输入脉冲宽度，输出波形如图 21.4 所示。注意，相对于脉冲宽度，暂态时间变得越短，输出脉冲的形状越接近输入脉冲。在下面的每种情况中，输出幅度都达到了输入的满幅度。

图 21.5 所示的是，固定的时间常数和变化的输入脉冲宽度对积分器输出的影响。从图中可以看出，脉冲宽度变得越宽，输出脉冲宽度越接近输入的脉冲宽度。同时，这表示暂态时间比脉冲宽度短。

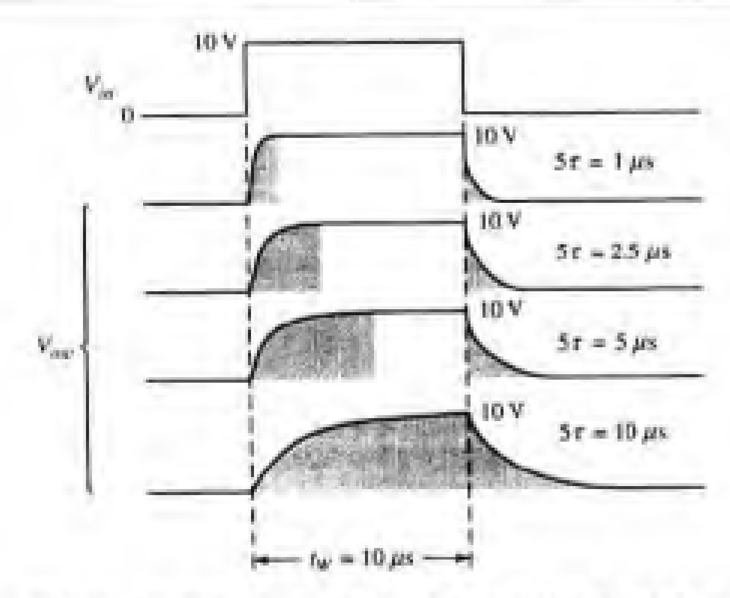


图 21.4　*RC* 积分器的输出脉冲形状随着时间常数的变化而变化。阴影区域表示的是电容正在充电或者放电

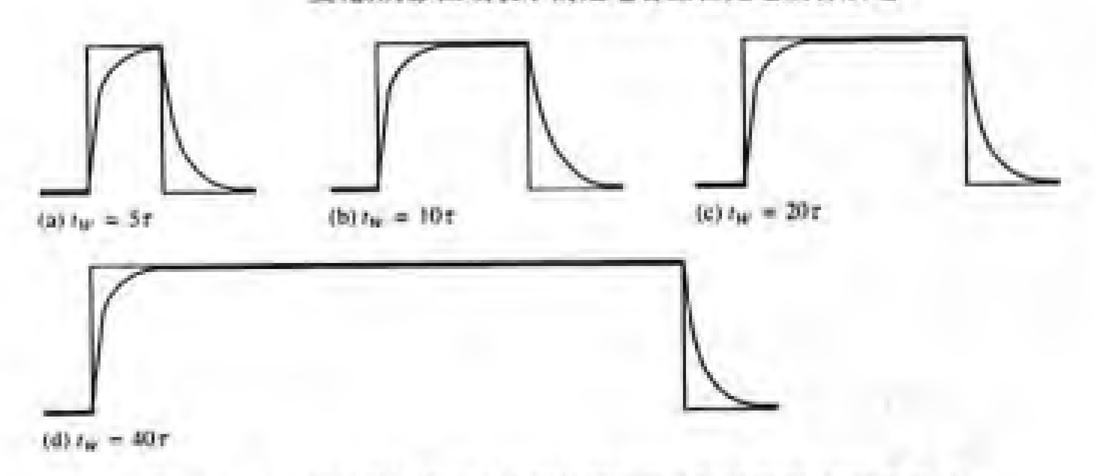


图 21.5　*RC* 积分器的输出脉冲形状随着输入脉冲宽度(时间常数是固定不变的)的变化而变化。方波代表输入，曲线代表输出

21.2.2　脉冲宽度小于五倍的时间常数

现在让我们看看下面这种情况：输入脉冲的宽度小于五倍的 *RC* 积分器的时间常数。这种情况表示为 $t_W < 5\tau$。

正如所知，电容是在脉冲的持续时间内充电。但是，因为脉冲宽度小于电容完全充电所需的时间(5τ)，所以在脉冲结束时，输出电压将不能达到输入电压的满幅。对于不同的 *RC* 时间常数值，电容只是部分充电，如图 21.6 所示。注意，时间常数越长，输出电压越小，因为电容不能充分充电。当然，在这些例子中都是单脉冲输入，脉冲结束后，电容完全放电。

时间常数远大于输入脉冲的宽度时，电容充电很少，因此输出电压几乎变得可以忽略不计，如图 21.6 所示。

图 21.7 所示的是，对于固定的时间常数，输入脉冲宽度变小的影响。输入脉冲的宽度变小时，输出电压变小，因为电容充电的时间不够。但是脉冲结束后，每种情况中的电容放电至零所需的时间，近似等于同样的时间长度(5τ)。

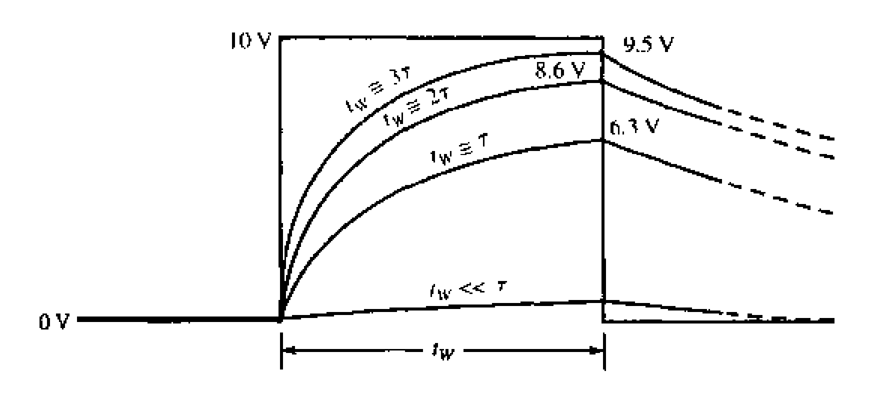


图 21.6　在大于输入脉冲宽度时，对于不同的时间常数，电容电压的图例。方波代表输入，曲线代表输出

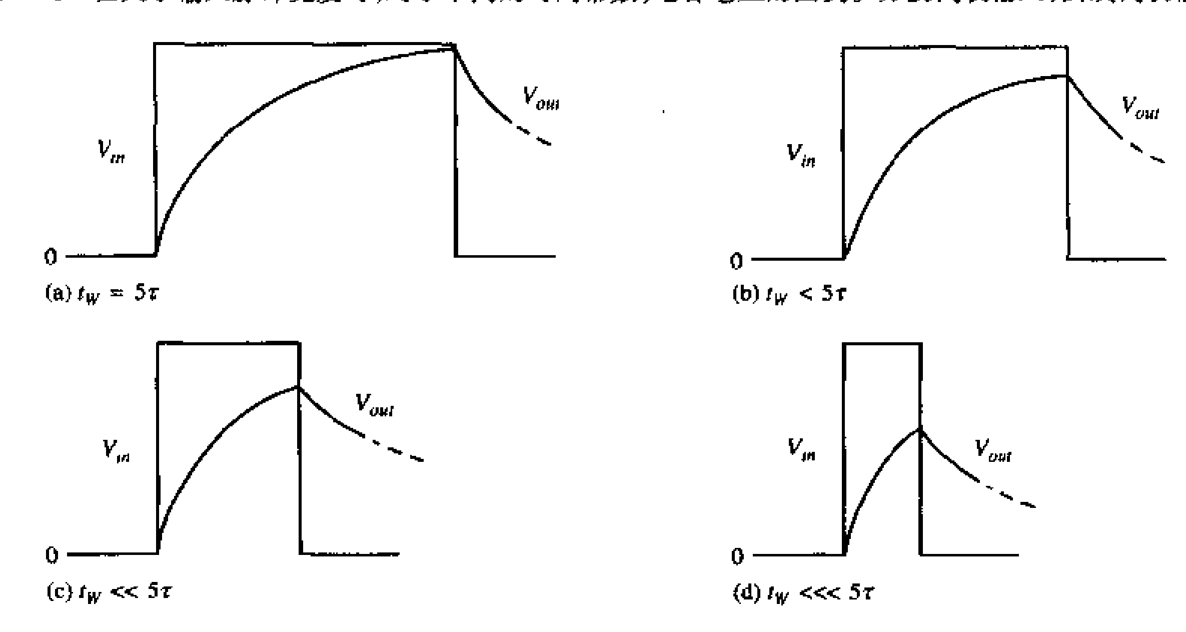


图 21.7　时间常数固定，随着输入脉冲宽度的减小，电容充电越来越少

例 21.1　如图 21.8 所示，积分器输入端的单脉冲幅值是 10 V，宽度是 100 μs。

(a) 给电容充电可以达到多少电压？

(b) 如果脉冲源的内阻是 50 Ω，那么电容放电需要多长时间？

(c) 画出输出电压的波形。

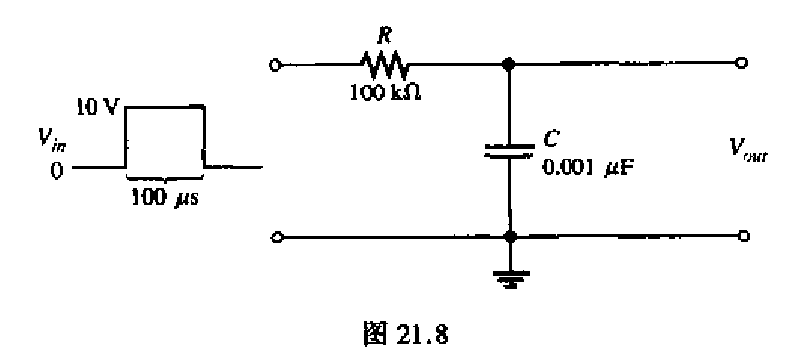


图 21.8

解：(a)电路的时间常数为：

$$\tau = RC = (100\ \text{k}\Omega)(0.001\ \mu\text{F}) = 100\ \mu\text{s}$$

注意，脉冲宽度正好等于时间常数。因此，电容在一个时间常数内的充电值大约为输入满幅度的 63%，可得输出达到的最大电压是：

$$V_{out} = (0.63)10\ \text{V} = 6.3\ \text{V}$$

(b) 脉冲结束时,电容通过电源放电。电源内阻 50 Ω 和 100 kΩ 的电阻串联时可忽略不计。因此,总的放电时间近似等于:

$$5\tau = 5(100\ \mu s) = \mathbf{500\ \mu s}$$

(c) 输出充电和放电的曲线如图 21.9 所示。

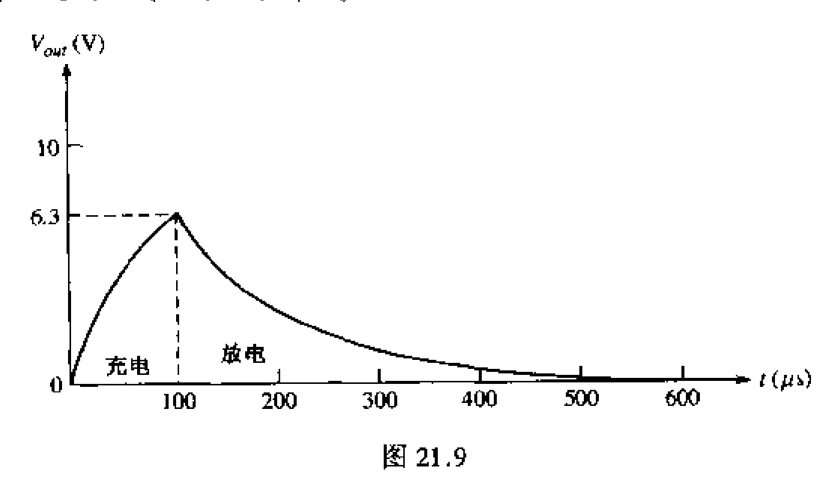


图 21.9

练习: 如图 21.8 所示,如果脉冲宽度变到 200 μs,电容充电电压将达到多少?

例 21.2　如果输入端连接一个单脉冲,如图 21.10 所示,求电容充电电压是多少?

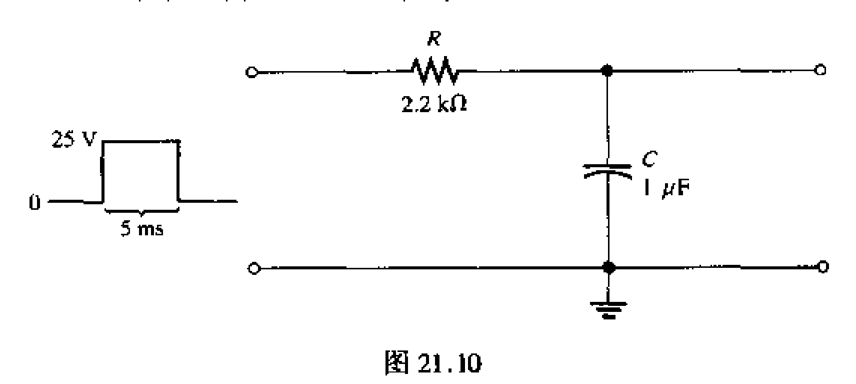


图 21.10

解: 先计算时间常数。

$$\tau = RC = (2.2\ k\Omega)(1\ \mu F) = 2.2\ ms$$

因为脉冲宽度是 5 ms,电容充电时间为 2.27 个时间常数(5 ms/2.2 ms = 2.27)。利用第 13 章的指数公式(13.20),可以求出电容充电电压值。当 $V_F = 25$ V,$t = 5$ ms 时,计算如下:

$$\begin{aligned} v &= V_F(1 - e^{-t/RC}) \\ &= (25\ V)(1 - e^{-5ms/2.2ms}) = (25\ V)(1 - e^{-2.27}) \\ &= (25\ V)(1 - 0.103) = (25\ V)(0.897) = \mathbf{22.4\ V} \end{aligned}$$

计算结果说明,电容在输入脉冲 5 ms 的持续时间内,充电电压为 **22.4** V。脉冲变为零时,电容将放电直到为零。

练习: 如果脉冲宽度变为 10 ms,那么电容的充电电压将达到多少?

21.2 节练习

1. *RC* 积分器连接一个脉冲输入,为了使输出电压达到满幅度,需要什么条件?
2. 图 21.11 所示的电路中,输入为一个单脉冲,求输出电压可以达到的最大值,并求电容放电时间是多少?

3. 如图 21.11 所示，画出输出电压相对于输入脉冲的大致波形。
4. 如果积分器的时间常数等于输入脉冲宽度，电容是否完全充电？
5. 在什么条件下，才能满足输出电压的波形大致为矩形的输入脉冲？

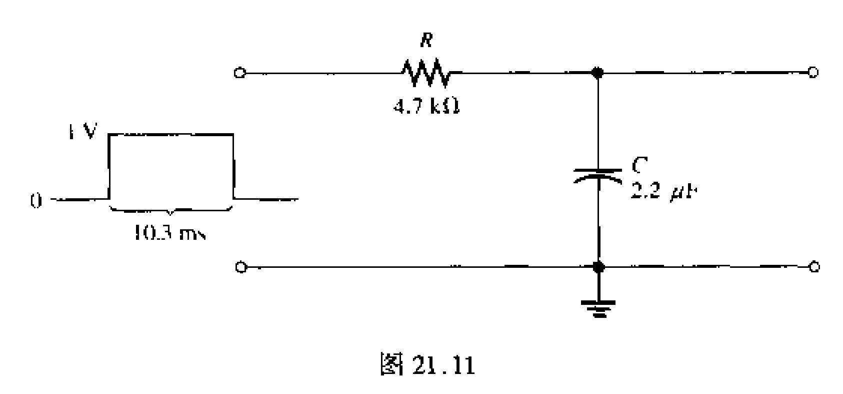


图 21.11

21.3 *RC* 积分器的序列脉冲响应

在上一节，介绍了 *RC* 积分器对单脉冲输入的响应。本节将延伸这些基本概念，探讨积分器的序列脉冲响应。在电子系统中，更多的是序列脉冲波形，而不是单脉冲。但是，为了理解这些电路对序列脉冲的响应，掌握积分器对单脉冲的响应是很必要的。

学完本节后，读者应该能够：

1. 分析序列脉冲输入的 *RC* 积分器
2. 电容没有完全充电或者放电时决定其响应
3. 定义稳定状态
4. 描述电路响应中时间常数增大的影响

如果 *RC* 积分器输入的是一个周期脉冲波形，如图 21.12 所示，输出波形取决于电路时间常数和输入脉冲频率（周期）的关系。当然，电容根据脉冲输入进行充电和放电。电容充电和放电的电量取决于电路的时间常数和输入的频率，如上所述。

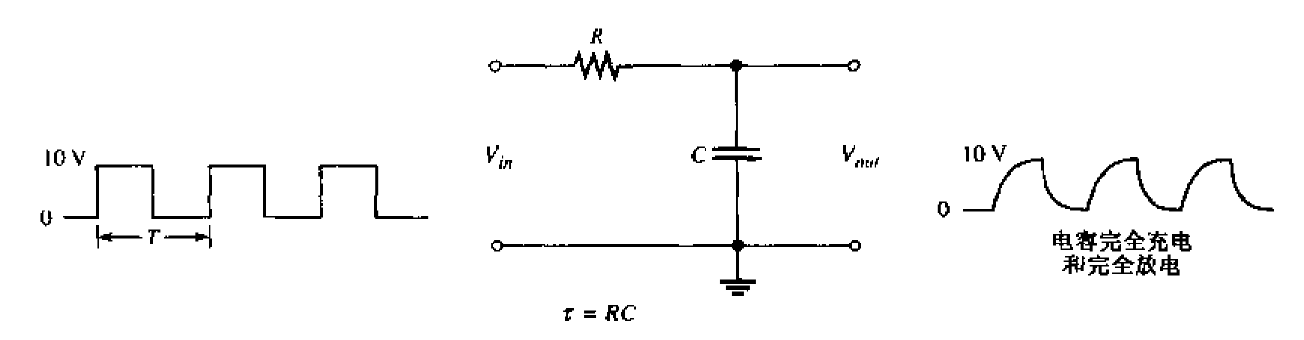


图 21.12　序列脉冲波形输入（$T = 10\tau$）的 *RC* 积分器

如果脉冲宽度和每个脉冲间的时间相等，均大于五倍的时间常数，那么在输入波形的每个周期内，电容将完全充电和完全放电。这种情况如图 21.12 所示。

21.3.1 电容没有完全充电和完全放电时

如果脉冲宽度和脉冲间的时间均比五倍的时间常数短，方波如图 21.13 所示，电容将不完全充电和放电。现在研究在这种条件下，*RC* 积分器的输出电压。

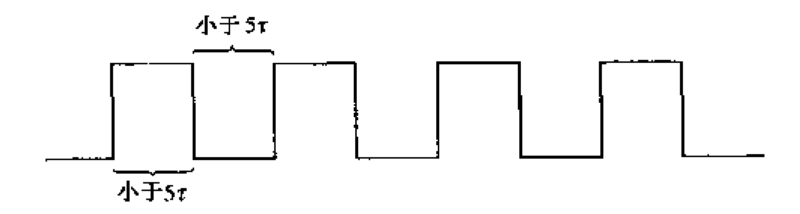


图 21.13　不满足 RC 积分器中的电容完全充电和完全放电时的输入波形

例如,假设 RC 积分器充电和放电的时间常数等于一个 10 V 方波输入的脉冲宽度,如图 21.14 所示。这样将简化分析,并证明在这些条件下,积分器的基本原理。在这里,不必关心确切的时间常数值是多少,因为已知 RC 电路在一个时间常数间隔内大约充电 63%。

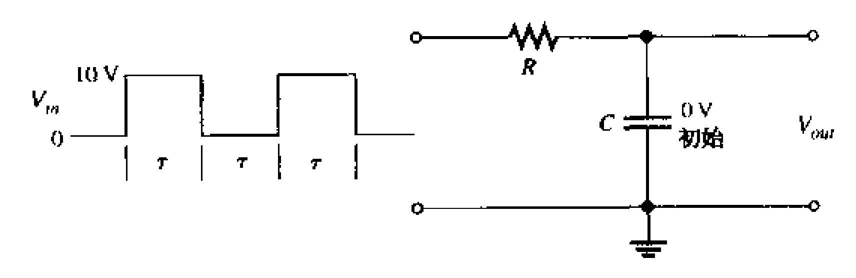


图 21.14　RC 积分器的输入是一个周期等于两倍时间常数($T = 2\tau$)的方波

假设图 21.14 中的电容最初未充电,判断每个基本脉冲的输出电压。图 21.15 所示的是 5 个脉冲充电和放电的波形。

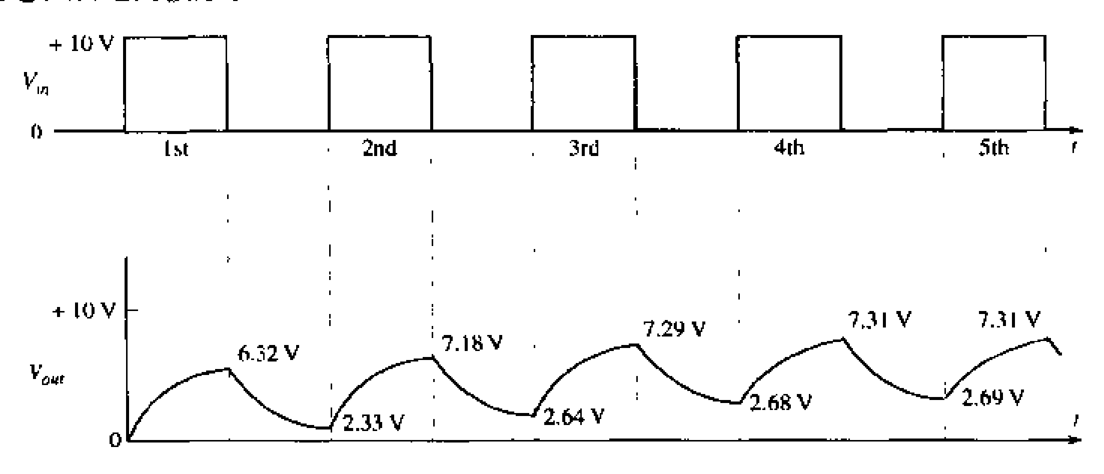


图 21.15　图 21.14 中初始未充电的积分器的输入和输出

第一个脉冲　在第一个脉冲期间内电容充电,输出电压达到 6.32 V(10 V 的 63.2%),如图 21.15 所示。

第一个脉冲和第二个脉冲之间　在此期间内电容放电,电压减少到初始电压的 36.8%:0.368(6.32 V) = 2.33 V。

第二个脉冲　电容电压初始值为 2.33 V,接着充电量为从 2.33 V 到 10 V 的 63.2%。计算如下:充电总范围 10 V − 2.33 V = 7.67 V。电容电压将上升到 7.67 V 的 63.2%,即为 4.85 V。因此在第二个脉冲结束时,输出电压为 2.33 V + 4.85 V = 7.18 V,如图 21.15 所示。注意,平均值在不断增加。

第二个脉冲和第三个脉冲之间　在此期间内电容放电，因此电容电压降为第二个脉冲结束时初始电压的 36.8%：0.368(7.18 V) = 2.64 V。

第三个脉冲　第三个脉冲初始时，电容电压为 2.64 V。电容充电量为从 2.64 V 到 10 V 的 63.2%：0.632(10 V - 2.64 V) = 4.65 V。因此，第三个脉冲结束时的电压是 2.64 V + 4.65 V = 7.29 V。

第三个脉冲和第四个脉冲之间　电容放电，所以在此期间内电压减少。电容电压降为第三个脉冲结束时初始电压的 36.8%。该间隔的最终电压是：0.368(7.29 V) = 2.68 V。

第四个脉冲　第四个脉冲初始时，电容电压为 2.68 V。充电上升到：0.632(10 V - 2.68 V) = 4.63 V。因此，第四个脉冲结束时的电压是 2.68 V + 4.63 V = 7.31 V。注意，脉冲继续输入，这些值不再增加。

第四个脉冲和第五个脉冲之间　在两个脉冲之间，电容电压降到 0.368(7.31 V) = 2.69 V。

第五个脉冲　在第五个脉冲期间，电容充电为 0.632(10 V - 2.69 V) = 4.62 V。自此，电容值保持在 2.69 V，脉冲结束时的电压是 2.69 V + 4.62 V = 7.31 V。

21.3.2 稳态响应

在前面的讨论中，输出电压平均值逐渐增大直到保持不变。这期间大概花了 5τ 的时间，使输出电压增大到一个稳定的平均值，这个间隔称为电路的暂态时间。一旦输出电压达到输入电压的平均值，只要这个周期脉冲继续输入，这个稳态响应将一直持续下去。基于上述讨论得出的数值，这种条件可以阐明为如图 21.16 所示。

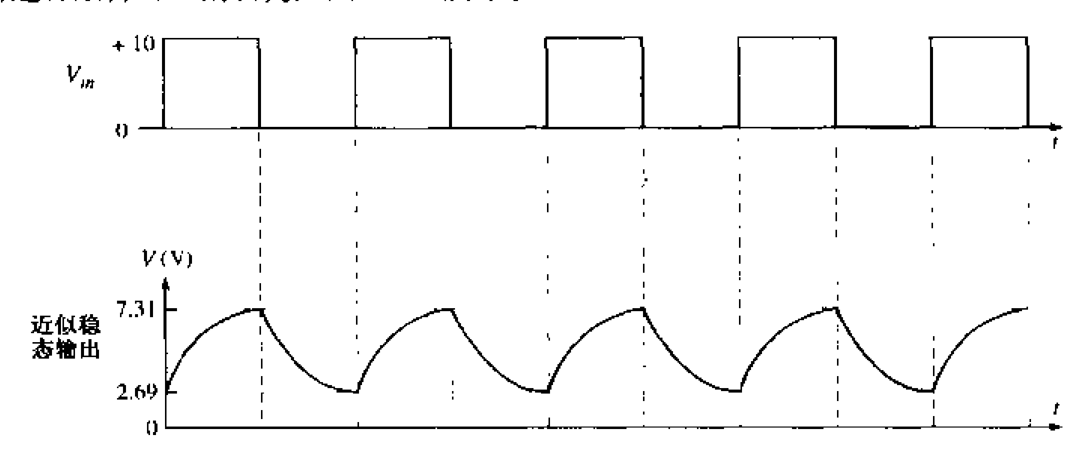


图 21.16　在 5τ 之后，输出达到稳定状态

在本例中电路的暂态时间是指，从第一个脉冲的初始到第三个脉冲末端的时间。理由是第三个脉冲末端时，电容电压值为 7.29 V，大约是最终电压的 99%。

21.3.3 时间常数增大的作用

如果积分器的 *RC* 时间常数通过一个可变电阻增大，如图 21.17 所示，那么输出电压会发生什么变化？随着时间常数增大，一个脉冲内电容充电变少，同时脉冲间的放电也变少。结果是，时间常数值变得越大，输出电压的波动越小，如图 21.18 所示。

当时间常数相对于脉冲宽度变得相当长的时候，输出电压接近一个恒定直流电压，如图 21.18(c)所示。直流电压值等于输入的平均值。对于方波而言，等于幅度的一半。

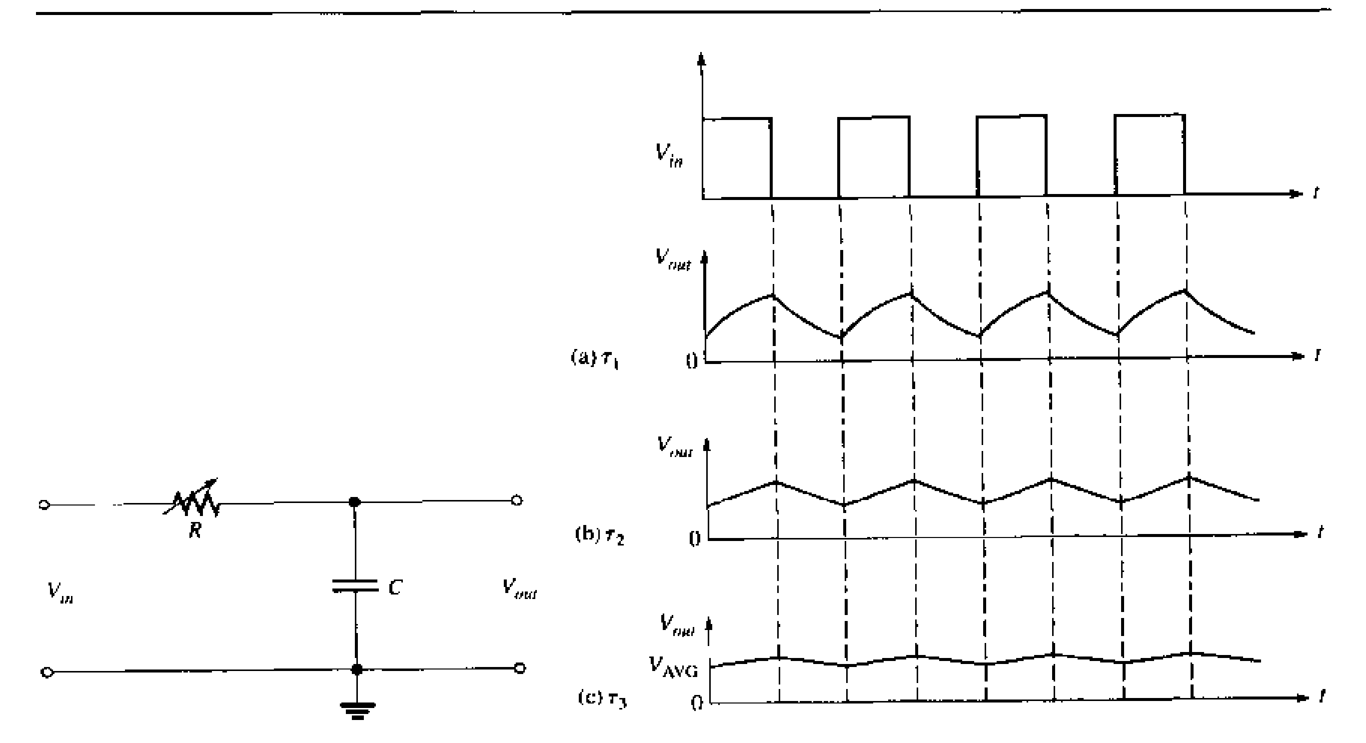


图 21.17 RC 时间常数可变的积分器　　图 21.18 时间常数变长对 RC 积分器输出的影响($\tau_3 > \tau_2 > \tau_1$)

例 21.3 如图 21.19 所示,当第一个和第二个脉冲输入到 RC 积分器,判断输出电压的波形。假设电容最初未充电,滑变电阻器的阻值为 5 kΩ。

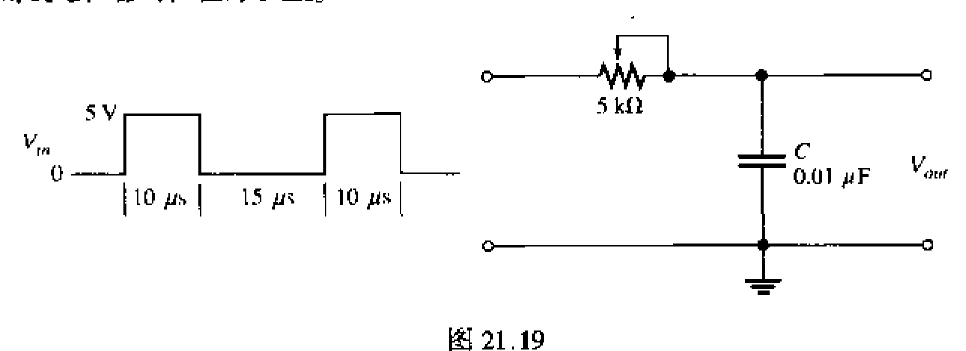


图 21.19

解:首先,计算电路的时间常数。

$$\tau = RC = (5\ \text{k}\Omega)(0.01\ \mu\text{F}) = 50\ \mu\text{s}$$

显然,时间常数远大于输入脉冲的宽度或脉冲间(由图中可看出输入不是方波)的间隔。在这种情况下,必须应用指数公式,而且分析相对困难。需要仔细进行下面的计算。

1. 第一个脉冲的计算:因为电容 C 在充电,使用指数增大的公式。其中,V_F 是 5 V,t 等于脉冲宽度 10 μs。因此,

$$v_C = V_F(1 - e^{-t/RC}) = (5\ \text{V})(1 - e^{-10\ \mu\text{s}/50\ \mu\text{s}})$$
$$= (5\ \text{V})(1 - 0.819) = \mathbf{906\ mV}$$

结果如图 21.20(a)所示。

2. 第一个和第二个脉冲之间间隔的计算:因为电容 C 在放电,使用指数减小的公式。其中,V_i 是 906 mV,因为电容是从第一个脉冲末端的电压值开始放电。放电时间是 15 μs。因此,

$$v_C = V_i e^{-t/RC} = (906\ \text{mV})e^{-15\ \mu\text{s}/50\ \mu\text{s}}$$
$$= (906\ \text{mV})(0.741) = \mathbf{671\ mV}$$

结果如图 21.20(b)所示。

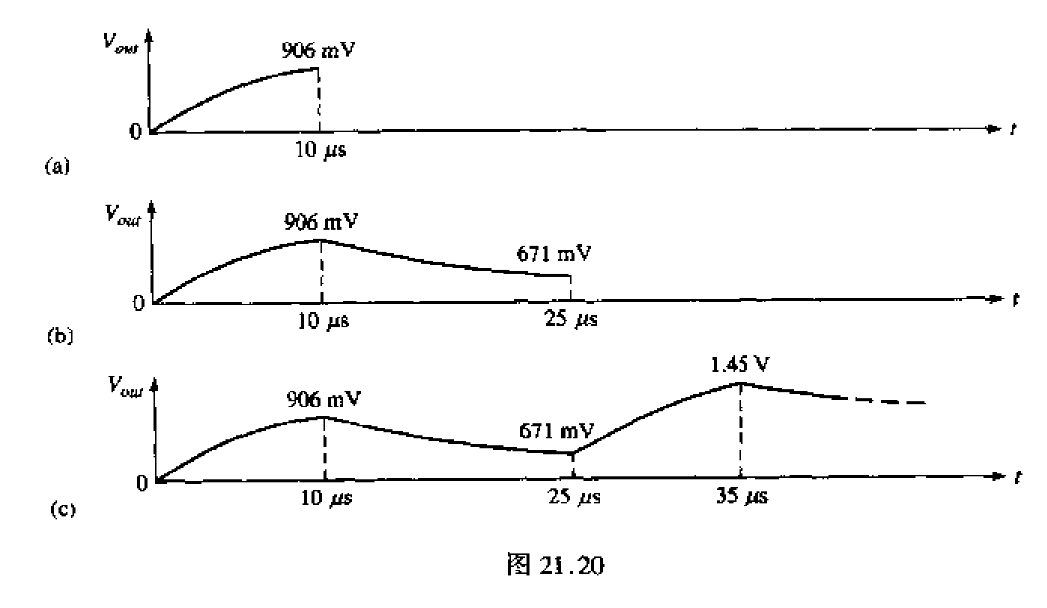


图 21.20

3. 第二个脉冲的计算：在第二个脉冲的初始时，输出电压是 671 mV。在第二个脉冲期间内，电容将再一次充电。在这种情况下，不是由零开始充电。经过先前的充电和放电，电容电压值为 671 mV。在这种情况下，可以使用一般指数公式。

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau}$$

由这个公式，可以算出在第二个脉冲的末端，通过电容的电压值，计算如下：

$$\begin{aligned} v_C &= V_F + (V_i - V_F)e^{-t/RC} \\ &= 5\text{ V} + (671\text{ mV} - 5\text{ V})e^{-10\,\mu s/50\,\mu s} \\ &= 5\text{ V} + (-4.33\text{ V})(0.819) = 5\text{ V} - 3.55\text{ V} = \mathbf{1.45\text{ V}} \end{aligned}$$

结果如图 21.20(c)所示。

需要注意的是，输出波形随着脉冲的持续输入不断变大。大约在 5τ 之后，将达到稳定状态。同时，在一个固定的最大值和固定的最小值之间波动，其平均值等于输入的平均值。这种波动方式将会在后面的例子中分析。

练习：第三个脉冲初始时，V_{out}是多少？

21.3 节练习

1. 输入端连接的是一个周期脉冲波形，满足什么条件，*RC* 积分器的电容将完全充电和完全放电？
2. 如果电路的时间常数与输入方波的脉冲宽度相比非常小，输出波形的形状是什么样？
3. 当 5τ 比输入方波脉冲的宽度大，输出电压不断变大直到稳定平均值时所需的时间称为什么？
4. 稳态响应的定义。
5. 在稳定状态期间，积分器输出电压的平均值等于什么？

21.4 *RC* 微分器的单脉冲响应

根据脉冲响应，输出电压是通过电阻获得的串联 *RC* 电路称为微分器。在频率响应方面，又是一个高通滤波器。微分器的术语源于微分的数学过程，在一定条件下，这种类型的电路近似于微分过程。

学完本节后，读者应该能够：

- 分析单脉冲输入的 *RC* 微分器
- 描述输入脉冲在上升沿的响应
- 对于不同的脉冲宽度和时间常数之间的关系，判断在一个脉冲期间或脉冲结束时的响应

图 21.21 所示的是一个带有脉冲输入的 *RC* 微分器。微分器的输出电压通过电阻获得，而积分器的输出电压通过电容获得，除此之外，微分器的原理和积分器的完全一样。电容呈指数充电的速率取决于 *RC* 时间常数。微分器的电阻电压的形状取决于电容的充电和放电过程。

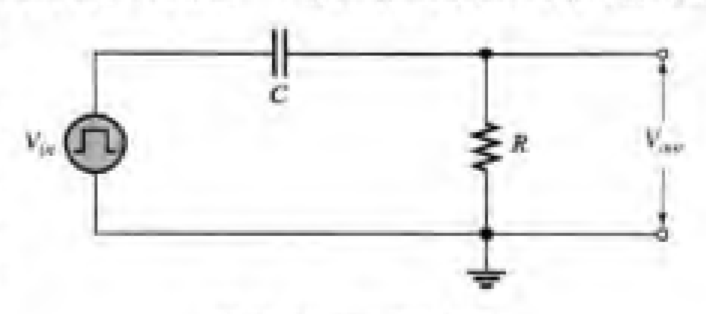


图 21.21　*RC* 微分电路

21.4.1　脉冲响应

为了理解微分器的输出电压是如何形成的，必须考虑下面几点：

1. 脉冲上升沿的响应
2. 上升沿和下降沿之间的响应
3. 下降沿的响应

输入脉冲上升沿的响应　假设电容在脉冲上升沿之前未充电。脉冲到达之前，输入是0 V。因此，通过电容和电阻的电压也均为 0 V，如图 21.22 (a)所示。

同时假设输入一个 10 V 的脉冲。当上升沿到达时，点 *A* 升到 +10 V。由于电容两端的电压不能发生突变，因此电容在瞬间视为短路。所以，如果点 *A* 突变到 +10 V，为了保持电容的电压在上升沿的瞬间依然为零，那么点 *B* 也必须突变到 +10 V。电容电压是指从点 *A* 到点 *B* 之间的电压差。

点 *B* 的对地电压是电阻两端的电压(也为输出电压)。因此，脉冲上升沿的响应为，输出电压在瞬间达到 +10 V，如图 21.22(b)中灰色所标示。

$t_W \geq 5\tau$ 时，在脉冲期间的响应　当脉冲在上升沿和下降沿之间的高电平时，电容进行充电。当脉冲宽度等于或者大于五倍的时间常数($t_W \geq 5\tau$)时，电容有足够的时间完全充电。

当电容两端的电压呈指数增大时，电阻两端的电压呈指数减小，直到电阻的电压变为 0 V 为止，与此同时电容完全充电(此时电压为 +10 V)。电阻的电压减少的原因是，根据基尔霍夫电压定律($v_C + v_R = v_{in}$)，在任何时刻，电容电压和电阻电压的和必须等于提供的电压。这部分的响应如图 21.22(c)所示。

$t_W \geq 5\tau$ 时，脉冲下降沿的响应　接着来分析在脉冲($t_W \geq 5\tau$)结束时，电容完全充电的情况。参考图 21.22(d)。在下降沿，输入脉冲突然从 +10 V 变回 0 V。在下降沿之前的瞬间，电容充电到 10 V，因此点 *A* 是 +10 V，点 *B* 是0 V。通过电容的电压不能发生突变，因此，当点 *A* 在下降沿时突然从 +10 V 变到 0 V 时，点 *B* 也必须有 10 V 的变化量，从 0 V 变为 −10 V。这样才能使在下降沿的瞬间，电容两端的电压保持在 10 V。

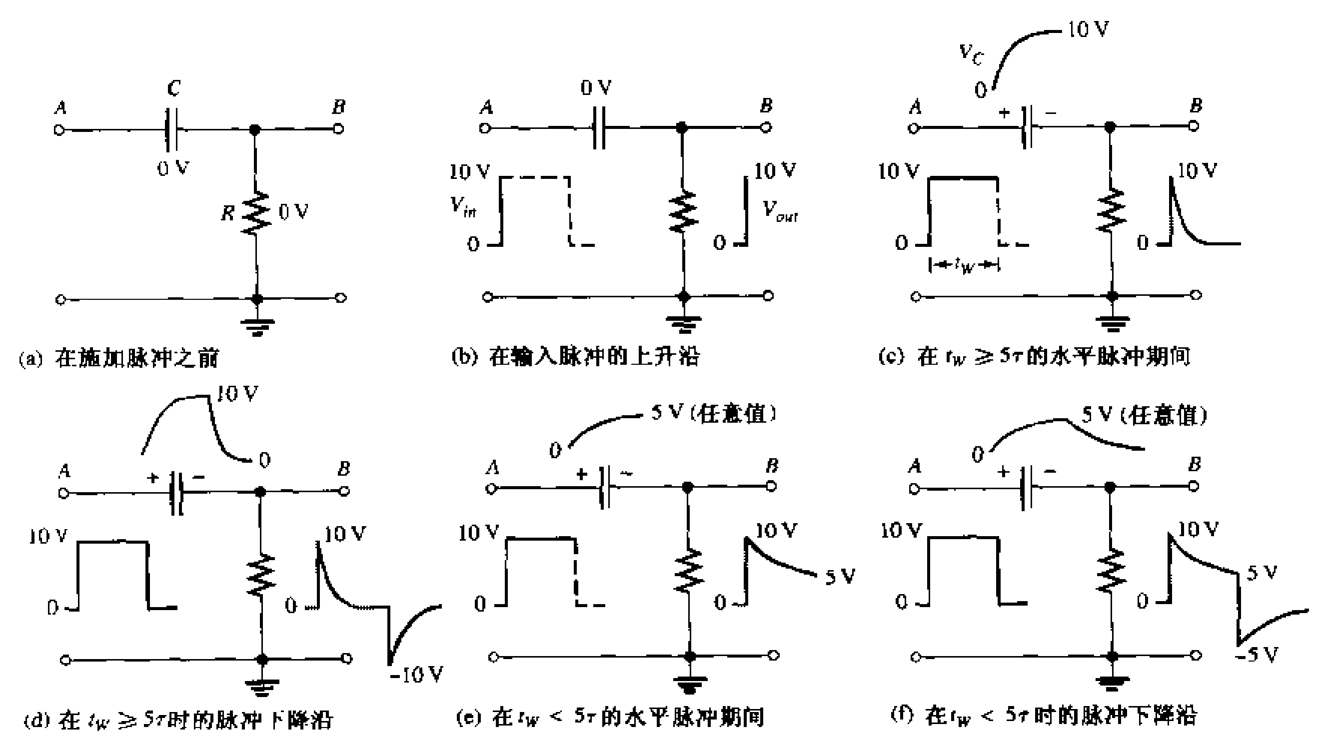


图 21.22　$t_W \geq 5\tau$ 和 $t_W < 5\tau$ 两种条件下，RC 微分器对单脉冲输入的响应图例

接着，电容开始呈指数放电。于是，电阻电压沿指数曲线从 - 10 V 变到 0 V，如图 21.22(d) 中灰色线条所示。

$t_W < 5\tau$ 时，脉冲期间的响应　如果脉冲的宽度小于五倍的时间常数($t_W < 5\tau$)，电容没有充足的时间完全充电。电容部分充电取决于时间常数和脉冲宽度的关系。

在脉冲的末端，因为电容没有达到满幅 + 10 V，所以电阻的电压也没有达到 0 V。例如，在脉冲期间内如果电容充电到 + 5 V，那么电阻电压将减少到 + 5 V，如图 21.22(e)所示。

$t_W < 5\tau$ 时，脉冲下降沿的响应　接下来分析在脉冲($t_W < 5\tau$)结束时电容部分充电的情况。例如，如果电容充电到 + 5 V，因为电容电压加上电阻电压之和必须达到 + 10 V，那么在下降沿之前的瞬间，电阻的电压也是 + 5 V，如图 21.22(e)所示。

下降沿到达时，点 A 从 + 10 V 变到 0 V。这使得点 B 从 + 5 V 变到 - 5 V，如图 21.22(f)所示。当然，电容的电压不能在下降沿的瞬间发生变化。一到达脉冲的下降沿，电容就开始放电直到为零。因此，电阻的电压从 - 5 V 变到 0 V，如图中所示。

21.4.2　RC 微分器对单脉冲响应的总结

总结本章的最好方法，是从 5τ 远小于脉冲宽度的这个极端，变化到 5τ 远大于脉冲宽度的另一个极端，观察微分器输出的一般波形。这些情形如图 21.23 所示。在图 21.23(a)中，输出是由狭窄的正向和负向"毛刺"构成的。在图 21.23(f)中，输出达到输入的形状。图 21.23(b)到图 21.23(e)分别表明这两个极端之间的不同条件。

如果交流耦合脉冲到示波器，可以观察到脉冲的波形如图 21.23(f)所示。此时，示波器耦合电路中的电容连接构成一个不必要的微分电路，使得脉冲下倾。为了避免出现这种情况，可以用直流耦合至示波器，并检查探头补偿。

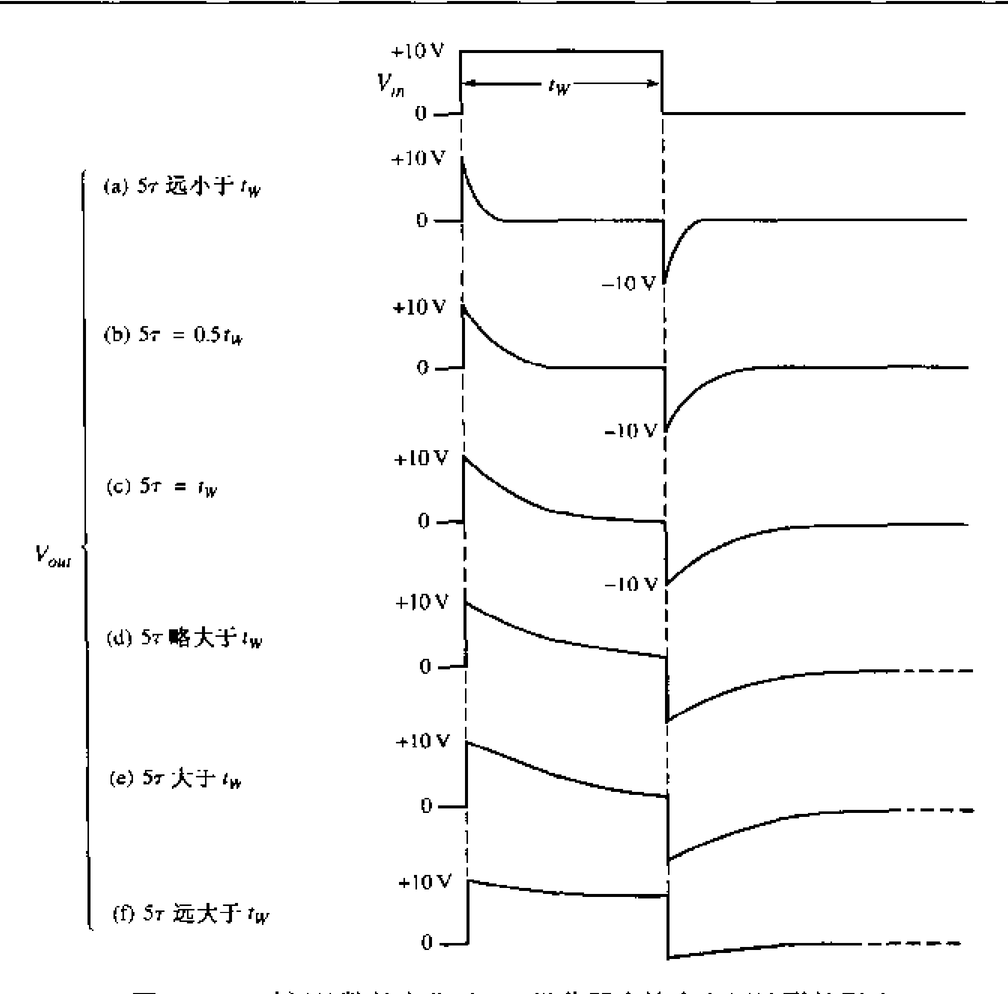


图 21.23 时间常数的变化对 *RC* 微分器中输出电压波形的影响

例 21.4 电路如图 21.24 所示,画出输出电压。

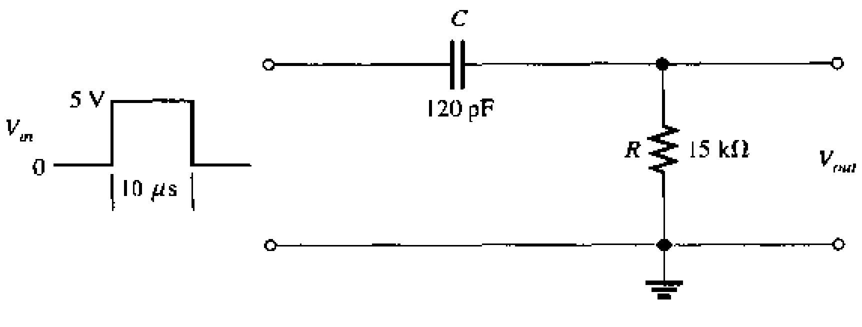


图 21.24

解: 首先计算时间常数。

$$\tau = RC = (15\ \text{k}\Omega)(120\ \text{pF}) = 1.8\ \mu\text{s}$$

在该例中 $t_W > 5\tau$,因此在脉冲结束之前,电容完全充电。在脉冲的上升沿处,电阻电压跳变到 +5 V,然后呈指数下降,在脉冲结束之前降到 0 V。在脉冲的下降沿处,电阻电压跳变到 −5 V,然后呈指数变化到 0 V。电阻的电压(也就是输出电压)的波形如图 21.25 所示。

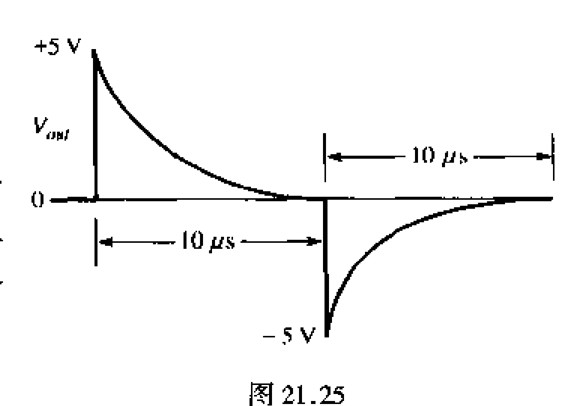


图 21.25

练习: 图 21.24 所示的电路中,将电容 *C* 改成 12 pF,画出输出电压。

例 21.5　RC 微分器如图 21.26 所示，通过可变电阻器，使得 R_1 和 R_2 的总电阻是 2 kΩ，判断输出电压的波形。

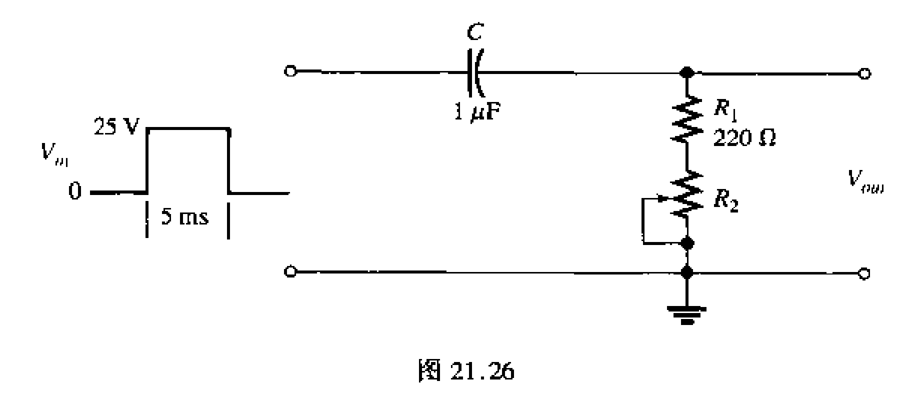


图 21.26

解：首先计算时间常数。

$$\tau = R_{tot}C = (2\ \text{k}\Omega)(1\ \mu\text{F}) = 2\ \text{ms}$$

在脉冲的上升沿处，电阻的电压突然跳变到 +25 V。因为脉冲的宽度是 5 ms，电容充电为 2.5 个时间常数，因此电容并没有完全充电。所以，为了计算在脉冲末端输出电压的减少额度，必须使用指数减小的公式。

$$v_{out} = V_i e^{-t/RC} = 25e^{-5\text{ms}/2\text{ms}} = 25(0.082) = 2.05\ \text{V}$$

其中 $V_i = 25$ V，$t = 5$ ms。该计算结果得出了在宽度间隔为 5 ms 的脉冲结束时，电阻的电压值(v_{out})。在脉冲的下降沿处，电阻电压突然从 +2.05 V 降到 −22.95 V(变化量为 25 V)。电压输出的最终波形如图 21.27 所示。

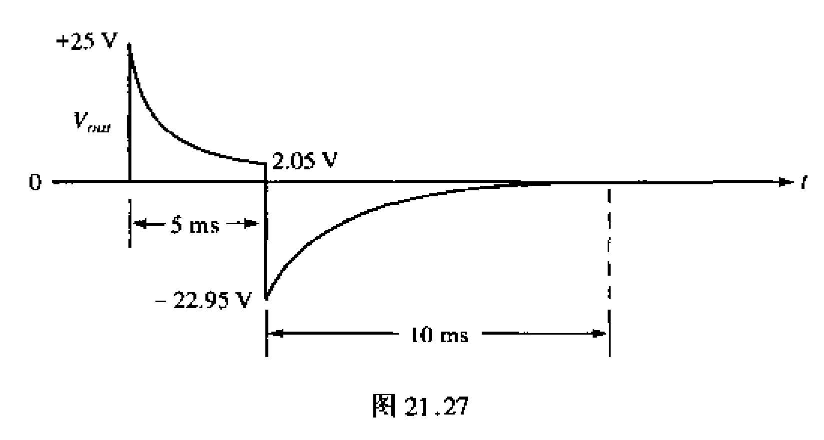


图 21.27

练习：如果图 21.26 所示的可变电阻器使得总电阻是 1.5 kΩ，那么脉冲末端的电压值是多少？

21.4 节练习

1. 输入脉冲为 10 V，$5\tau = 0.5t_W$，画出微分器的输出。
2. 在什么条件下，可以使得输出脉冲的波形最大可能地近似于微分器的输入脉冲？
3. 当 5τ 远小于输入脉冲的宽度时，微分器的输出近似于什么？
4. 如果微分电路中，在 15 V 输入脉冲的末端电阻电压降到 +5 V，那么在输入脉冲的下降沿响应时，电阻电压将降到负向的多少？

21.5　RC 微分器的序列脉冲响应

上一节讲述的是，RC 微分器的单脉冲响应，这一节将继续阐述序列脉冲响应。

学完本节后，读者应该能够：

- 分析序列脉冲输入的 *RC* 微分器
- 判断输入脉冲的宽度小于五倍时间常数时的响应

如果 *RC* 微分电路连接的是一个周期性脉冲波形，同样有两种可能情况：$t_W \geq 5\tau$ 或者 $t_W < 5\tau$。当 $t_W = 5\tau$ 时，输出如图 21.28 所示。当时间常数减小时，输出的正向部分和负向部分均变窄。注意，输出的平均值是 0 V。

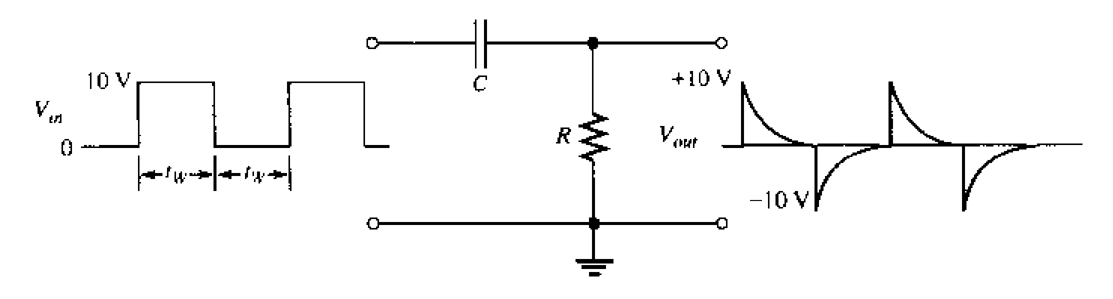


图 21.28　$t_W = 5\tau$ 时，微分器响应的图例

$t_W < 5\tau$ 时，稳态输出如图 21.29 所示。当时间常数增大时，正向的和负向的倾斜部分变得平坦了。对于一个很长的时间常数而言，输出的形状近似于输入的形状，但是输出的平均值为零。平均值为零意味着，波形的正向部分和负向部分相同。波形的平均值是其直流分量。因为电容隔直流，输入的直流分量被阻止通过而不能到达输出，因此平均值为 0 V。

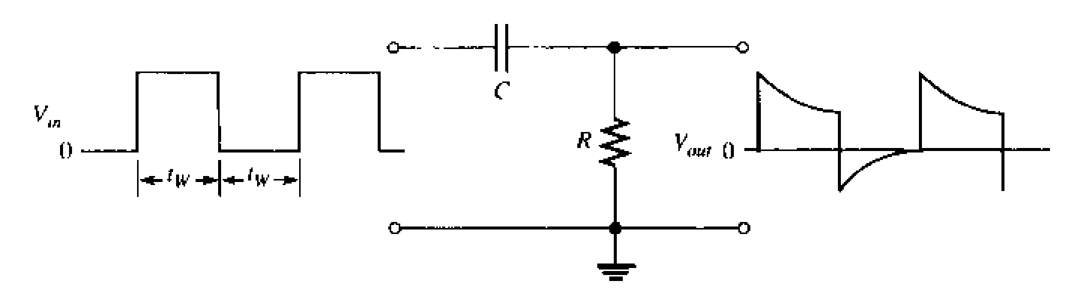


图 21.29　$t_W < 5\tau$ 时，微分器响应的图例

21.5.1　序列波形的分析

如同积分器一样，微分器的输出到达稳定状态也需要时间(5τ)。为了证明响应，以时间常数等于输入脉冲宽度为例。这里，我们不关心电路的时间常数是多少，因为已知电阻电压将呈指数减少，大约为一个脉冲(1τ)最大值的 37%。

假设图 21.30 所示的电容初始未充电，接着对每个脉冲逐个分析输出的电压。分析的结果如图 21.31 所示。

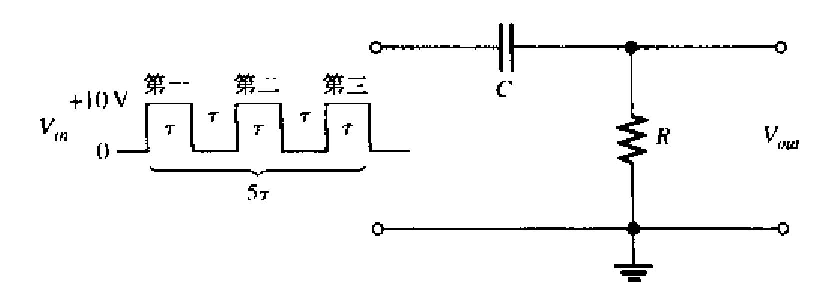


图 21.30　$\tau = t_W$ 时的 *RC* 微分器

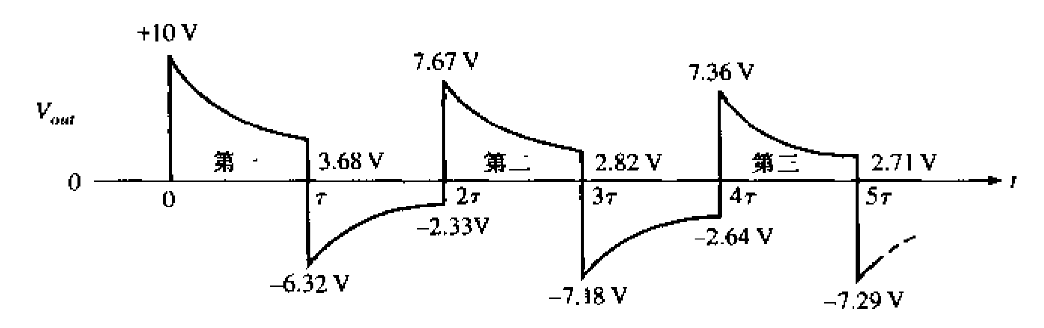


图 21.31 在暂态时间内,图 21.30 中微分电路的输出波形

第一个脉冲 在脉冲上升沿,输出时间跳变到 + 10 V。接着,电容部分充电到 10 V 的 63.2%,即为 6.32 V。因此,输出的电压必须减少到 3.68 V,如图 21.31 所示。

在脉冲下降沿,输出在瞬间获得一个负向的变化量 10 V,变为 - 6.32 V(- 10 V + 3.68 V = - 6.32 V)。

第一个脉冲和第二个脉冲之间 电容放电到初始电压的 36.8%,即为 2.33 V。因此,电阻电压必须从初始的 - 6.32 V 上升到 - 2.33 V。这是为什么? 因为在下一个脉冲之前的瞬间,输入电压为 0 V。因此,v_C 和 v_R 之和必须等于 0 V(2.33 V - 2.33 V = 0)。根据基尔霍夫电压定律,总是有 $v_C + v_R = v_{in}$。

第二个脉冲 在脉冲上升沿,输出获得一个瞬间正向 10 V 的变化量,从 - 2.33 V 变到 7.67 V。因此在脉冲的末端,电容充电为 0.632 × (10 V - 2.33 V) = 4.85 V。所以,电容电压从 2.33 V 增加到 2.33 V + 4.85 V = 7.18 V。输出电压降到 0.368 × 7.67 V = 2.82 V。

在脉冲下降沿,输出获得一个瞬间负向的变化量,从 2.82 V 变到 - 7.18 V,如图 21.31 所示。

第二个脉冲和第三个脉冲之间 电容放电量为 7.18 V 的 36.8%,即为 2.64 V。因为在第三个脉冲到达之前的瞬间(输入为零),电容电压和电阻电压之和必须为零。所以,输出的电压从初始的 - 7.18 V 上升到 - 2.64 V。

第三个脉冲 在脉冲的上升沿,输出获得一个瞬间的 10 V 变化量,从 - 2.64 V 变到 + 7.36 V。接着,电容充电从 0.632 × (10 V - 2.64 V) = 4.65 V,变到 2.64 V + 4.65 V = 7.29 V。所以,电压的输出降为 0.368 × 7.36 V = 2.71 V。在脉冲的下降沿,输出在瞬间从 + 2.71 V 降为 - 7.29 V。

第三个脉冲之后,五个时间常数已经过去了,输出的电压很接近于其稳定状态。因此,将继续从正的最大值 + 7.3 V 左右,到负的最大值 - 7.3 V 左右之间改变。其中,输出的平均值为零。

21.5 节练习

1. 输入为一个周期性脉冲波形,在什么条件下,*RC* 微分器将完全充电和放电。
2. 如果电路的时间常数相对于方波输入的脉冲宽度相当小,输出波形的形状是什么?
3. 在稳定状态中,微分器输出电压的平均值是多少?

21.6 *RL* 积分器的脉冲响应

根据脉冲响应,输出电压是通过电阻获得的串联 *RL* 电路称为积分器。

学完本节后,读者应该能够:

1. 分析 *RL* 积分器的原理
2. 判断单脉冲输入的响应

RL 积分器如图 21.32 所示。输出波形是通过电阻获得的,在同样的条件下,和 *RC* 积分器的输出波形是一样的。需要注意的是,在 *RC* 电路中输出是通过电容得到的。

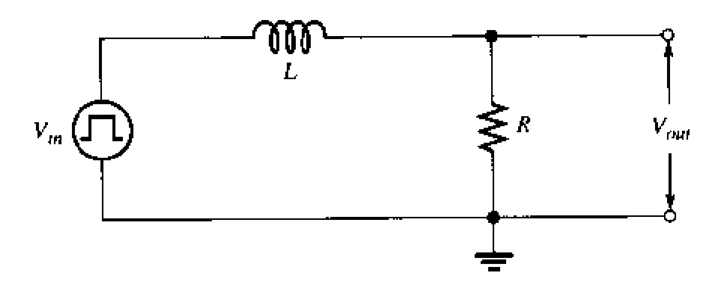


图 21.32 *RL* 积分电路

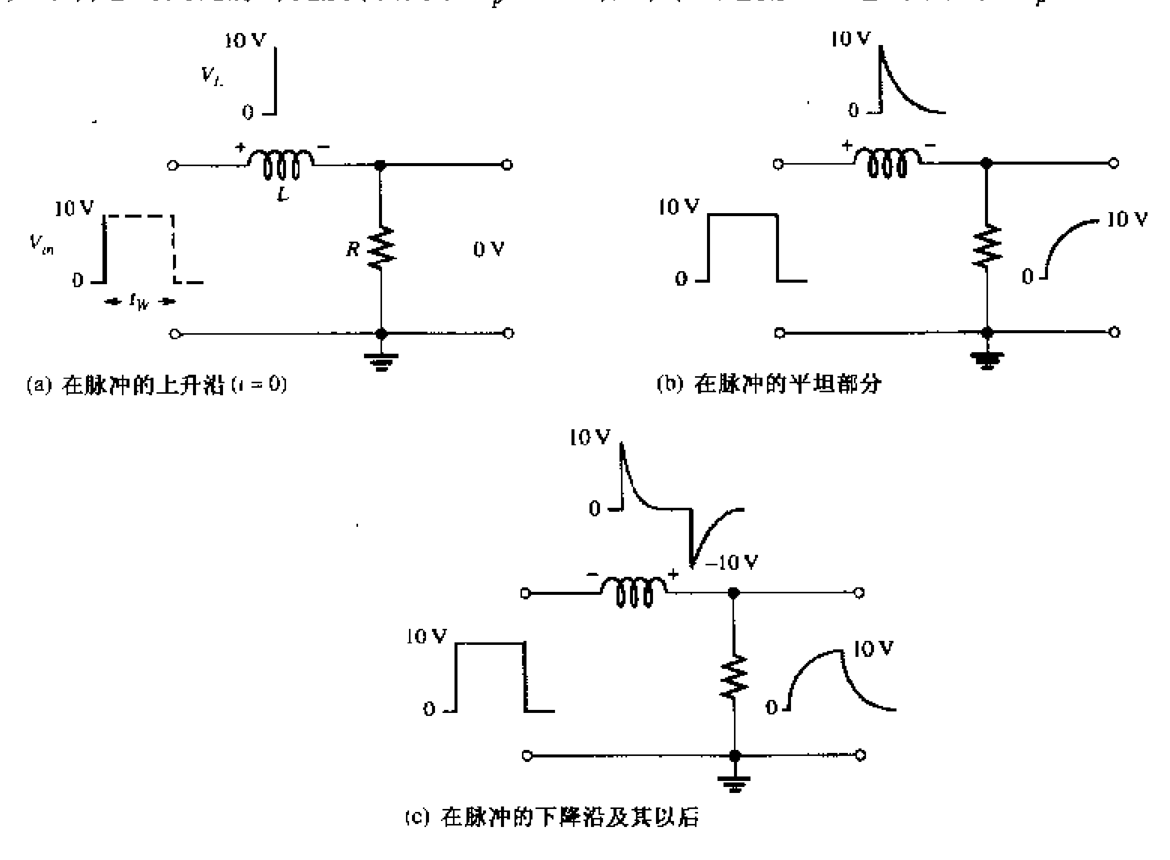
正如所知,理想脉冲的每一个边沿都是瞬间的。下面两条基本原则将有助于分析 *RL* 电路对脉冲输入的响应:

1. 对于电流的瞬间变化,电感视为开路;对于直流电压,电感视为短路(理想状态)。
2. 电感中的电流不能突然改变——只能呈指数变化。

21.6.1 *RL* 积分器的单脉冲响应

脉冲发生器连接到积分器的输入端,脉冲的电压从低电平变到高电平时,电感阻止电流的突变。因此电感视为开路,在脉冲上升沿的瞬间,所有的输入电压都加在了电感上。这种情况如图 21.33(a)中灰色线条所标示。

在上升沿之后,电流开始积累增大,同时输出电压随着电流呈指数增加,如图 21.33(b)所示。如果暂态时间比脉冲宽度(该例中 $V_p = 10$ V)短,那么电流可以达到最大值 V_p/R。



(a) 在脉冲的上升沿 ($t = 0$)

(b) 在脉冲的平坦部分

(c) 在脉冲的下降沿及其以后

图 21.33 *RL* 积分器脉冲响应的图例($t_W > 5\tau$)

脉冲从高电平变回低电平时，为了保持电流等于 V_p/R，线圈产生了相反方向的感应电压。输出电压开始呈指数减少，如图 21.33(c)所示。

输出的精确波形取决于 L/R 个时间常数，正如图 21.34 所总结的时间常数和脉冲宽度之间的多种关系。值得注意的是，这里 RL 电路响应的输出在波形方面，和 RC 积分器的输出是一样的。L/R 时间常数和输入脉冲宽度之间的关系同 RC 时间常数也有同样的作用，如图 21.4 所示。例如 $t_W < 5\tau$ 时，输出的电压不能达到最大的可能值。

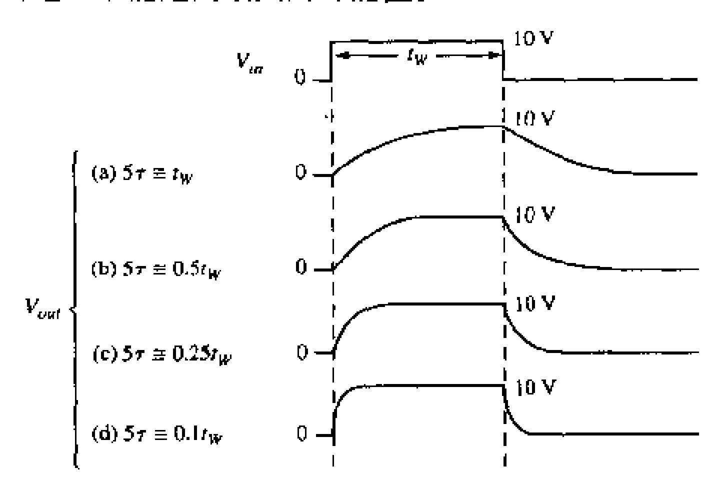


图 21.34 RL 积分器的时间常数改变使得输出脉冲波形变化的图例

例 21.6 RL 积分器如图 21.35 所示，如果输入的是图中所示的单脉冲，求输出电压的最大值。其中，可变电阻器使得总电阻为 50 Ω。

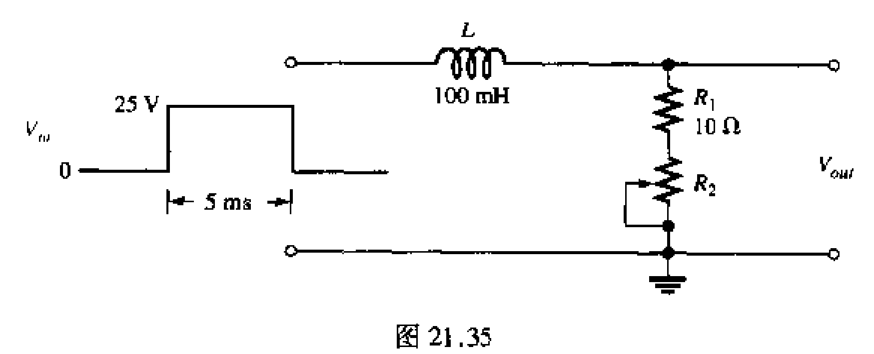


图 21.35

解： 计算时间常数。

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{100\text{ mH}}{50\,\Omega} = 2\text{ ms}$$

脉冲宽度是 5 ms，电感充电为 2.5τ。利用指数公式计算电压。

$$v_{out(max)} = V_F(1 - e^{-t/\tau}) = 25(1 - e^{-5\text{ms}/2\text{ms}})$$

$$= 25(1 - e^{-2.5}) = 25(1 - 0.082) = 25(0.918) = \mathbf{22.9\ V}$$

练习： 如图 21.35 所示，如果在脉冲的末端输出电压达到 25 V，那么电阻器 R_2 的电阻值是多少？

例 21.7 一个脉冲连接到 RL 积分器，如图 21.36 所示。求 I，V_R 和 V_L 的完整波形和幅值。

解： 电路的时间常数是：

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{5\text{ mH}}{1.5\text{ k}\Omega} = 3.33\,\mu\text{s}$$

因为 $5\tau = 16.7\,\mu\text{s}$ 小于 t_W，电流将达到最大幅值，并保持不变直到脉冲结束。

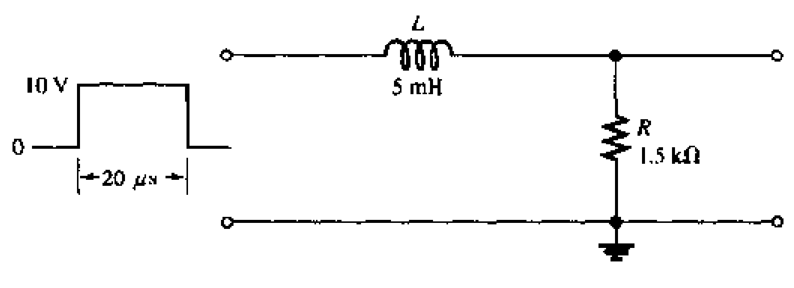


图 21.36

在脉冲的上升沿,

$$i = 0\text{ A}$$
$$v_R = 0\text{ V}$$
$$v_L = 10\text{ V}$$

电感最初视为开路,因此所有的输入电压都加在 L 上。

在脉冲期间,

i 在 16.7 μs 内呈指数增加到 $\frac{V_p}{R} = \frac{10\text{ V}}{1.5\text{ k}\Omega} = 6.67\text{ mA}$。

v_R 在 16.7 μs 内呈指数增加到 10 V。

v_L 在 16.7 μs 内呈指数减少到 0。

在脉冲的下降沿,

$$i = 6.67\text{ mA}$$
$$v_R = 10\text{ V}$$
$$v_L = -10\text{ V}$$

在脉冲过后,

i 在 16.7 μs 内呈指数减少到 0。

v_R 在 16.7 μs 内呈指数减少到 0。

v_L 在 16.7 μs 内呈指数增加到 0。

波形如图 21.37 所示。

练习: 如图 21.36 所示,如果输入脉冲的幅度增加到 20 V,输出电压的最大值将是多少?

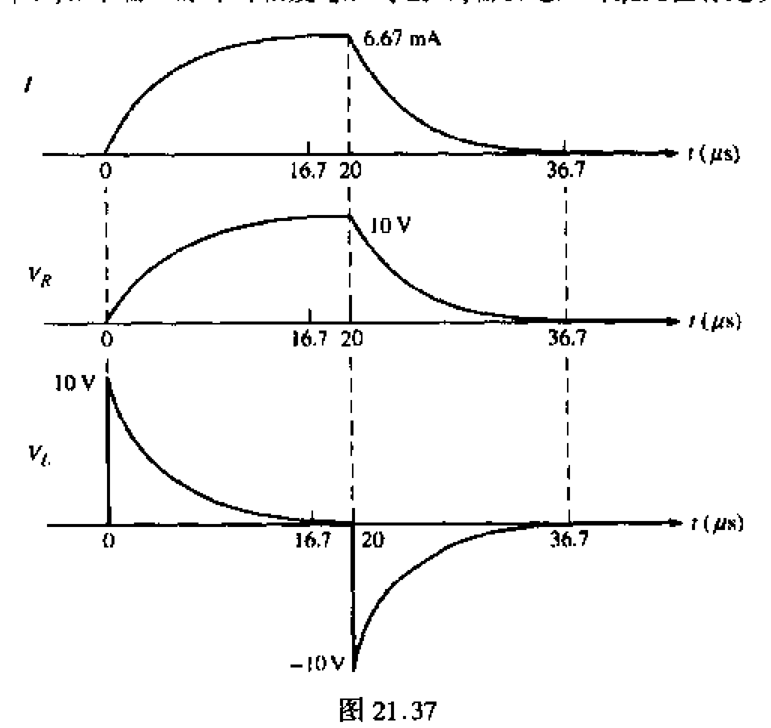


图 21.37

例 21.8 *RL* 积分器的输入脉冲幅度为 10 V,宽度为 1 ms,如图 21.38 所示。求在脉冲期间内,输出电压值可以达到多少? 如果源的内阻为 30 Ω,输出衰减到 0 V 所需的时间是多少? 画出电压输出的波形.

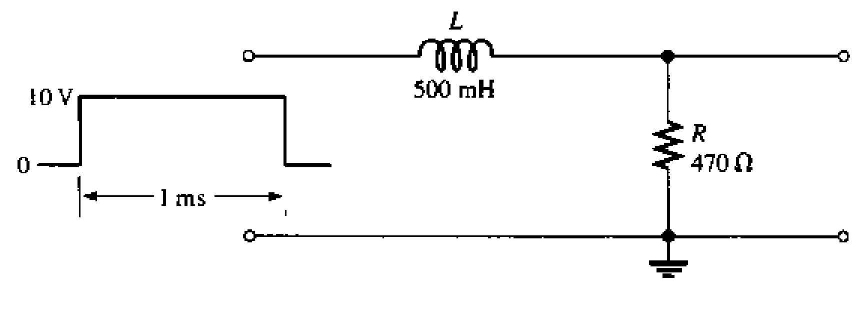


图 21.38

解:电感通过 30 Ω 的源电阻和 470 Ω 的外部电阻进行充电。时间常数是:

$$\tau = \frac{L}{R_{tot}} = \frac{500\ \text{mH}}{470\ \Omega + 30\ \Omega} = \frac{500\ \text{mH}}{500\ \Omega} = 1\ \text{ms}$$

注意,该例中脉冲的宽度正好等于 τ。由此,输出 V_R 在 1τ 内,将达到输入满幅度的 63% 左右。因此在脉冲结束时,输出的电压达到 6.3 V。

脉冲过后,电感通过 30 Ω 的电阻和 470 Ω 的电阻开始放电。5τ 之后,电感完全放电。

$$5\tau = 5(1\ \text{ms}) = 5\ \text{ms}$$

输出电压如图 21.39 所示。

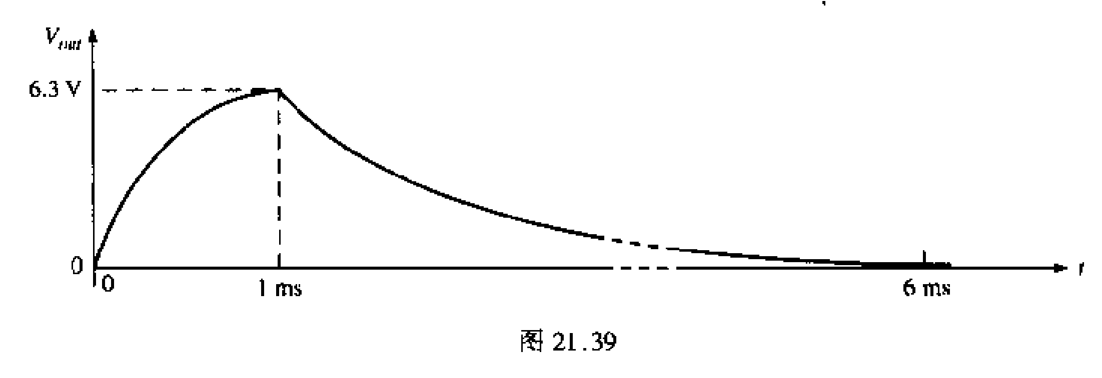


图 21.39

练习:电阻 *R* 的值必须是多少,才能满足输出的电压在脉冲期间内能够达到输入的电平?

21.6 节练习

1. *RL* 积分器中,输出的电压是通过哪个部分获得的?
2. *RL* 积分器接入一个脉冲,为了使输出的电压达到输入的幅度,需要什么条件?
3. 在什么条件下,输出电压的波形能够近似于输入脉冲的波形?

21.7 *RL* 微分器的脉冲响应

输出电压通过电感获得的 *RL* 串联电路称为微分器。

学完本节后,读者应该能够:

- 分析 *RL* 微分器的原理
- 判断单脉冲输入的响应

21.7.1 RL 微分器对单脉冲的响应

图 21.40 所示的是一个脉冲发生器连接到输入的 RL 微分器。最初，在脉冲开始之前电路中没有电流。当输入脉冲从低电平变到高电平时，电感阻止了电流的突然变化。正如所知，产生的感应电压同输入大小相等、方向相反。因此将电感 L 视为一个开路，在输入 10 V 的脉冲上升沿的瞬间，所有输入的电压都加在了电感上，如图 21.41(a)所示。

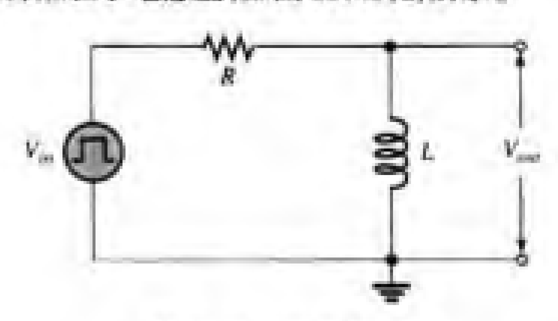


图 21.40 RL 微分电路

在脉冲期间，电流呈指数增大。因此电感的电压减少，如图 21.41(b)所示。已经学过，减小的速率取决于 L/R 时间常数。输入脉冲的下降沿出现时，通过产生的感应电压，电感起到维持电流的作用，感应电压的方向如图 21.41(c)所示。这个过程可看成是电感电压在瞬间得到一个负向变化量，如图 21.41(c)和图 21.41(d)所示。

两种可能的情况如图 21.41(c)和图 21.41(d)所示。在图 21.41(c)中，5τ 比输入脉冲的宽度大，输出的电压没有足够的时间衰减到零。在图 21.41(d)中，5τ 小于或者等于输入脉冲的宽度，因此在脉冲结束之前，输出的电压可以衰减到零。在本例中，在长尾边沿产生了一个满幅度负向的 10 V 变化量。

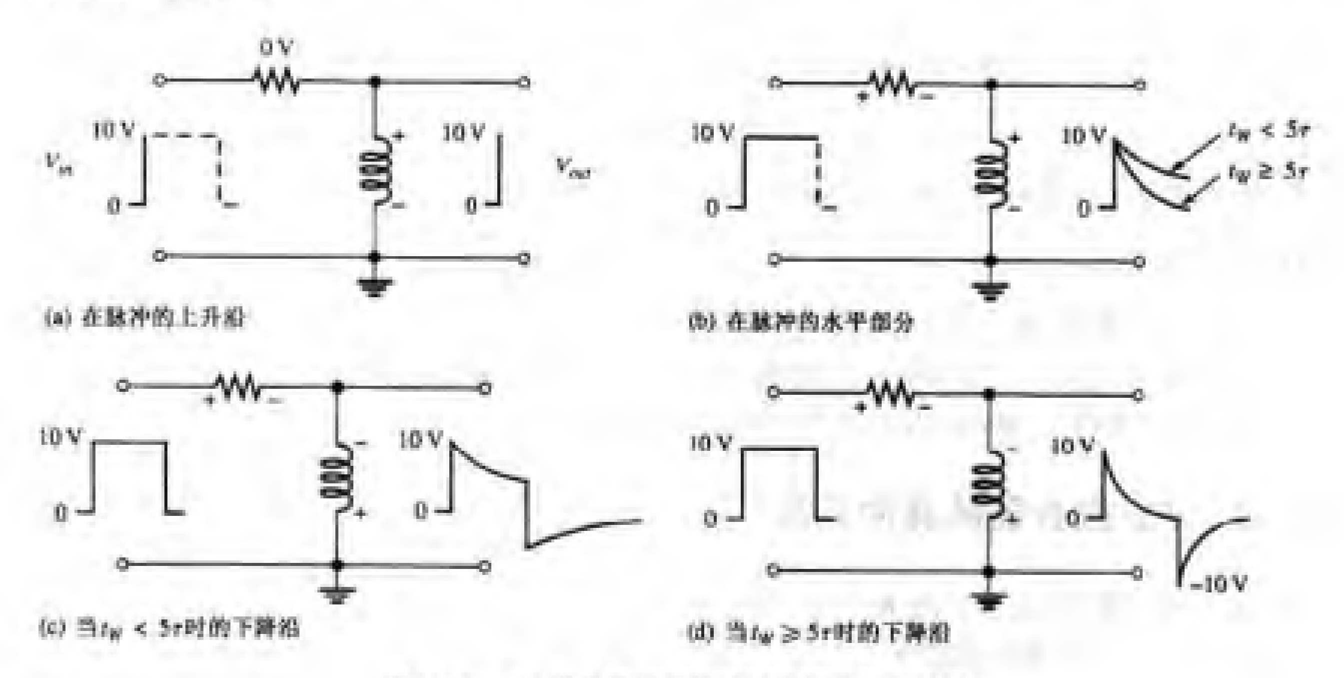


图 21.41 RL 微分器对两种时间常数的响应图例

需要记住的是，就输入和输出的波形而言，RL 积分器和微分器同 RC 相应部分发挥同样的作用。RL 微分器响应对应于时间常数和脉冲宽度多种关系的小结如图 21.42 所示。

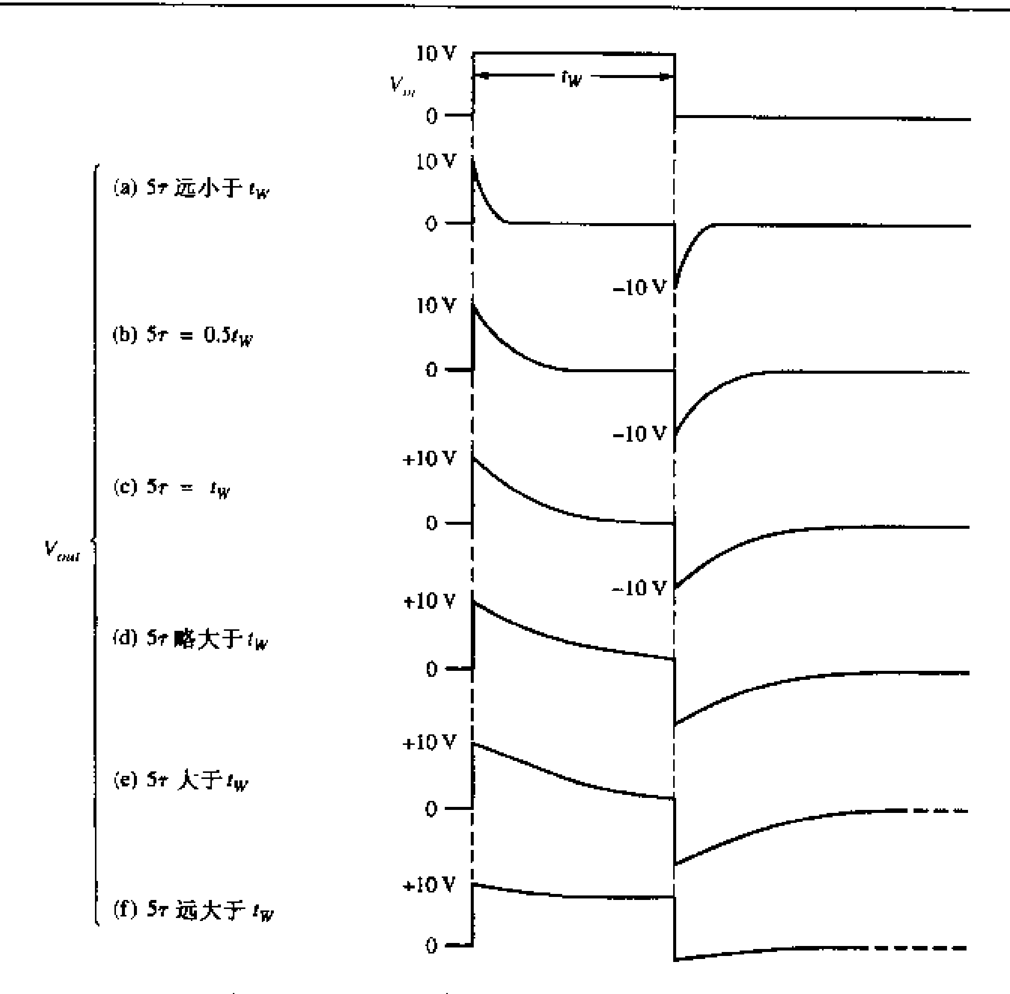


图 21.42　*RL* 时间常数不同，输出脉冲不同的图例

例 21.9　画出图 21.43 中电路的输出电压。

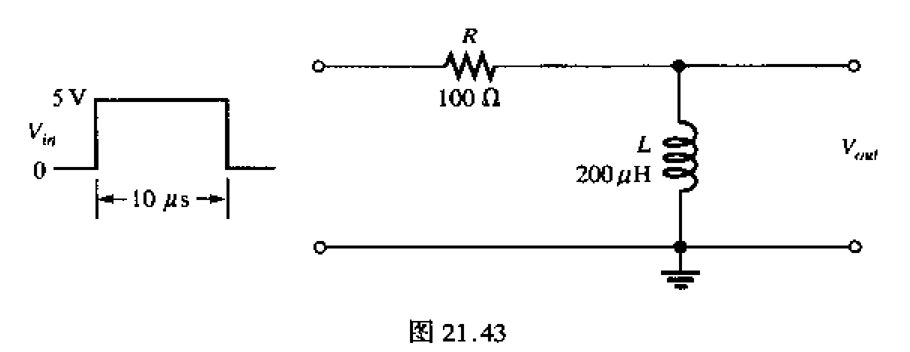


图 21.43

解：首先计算时间常数。

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{200\ \mu\text{H}}{100\ \Omega} = 2\ \mu\text{s}$$

本例中，$t_W = 5\tau$。因此脉冲结束时，输出将衰减到 0 V。在脉冲的上升沿，电感电压跳变到 +5 V，然后呈指数衰减到 0 V。在下降沿到达的瞬间，电压达到 0 V 左右。在输入的下降沿，电感的电压跳变到 −5 V，然后又变回 0 V。输出波形如图 21.44 所示。

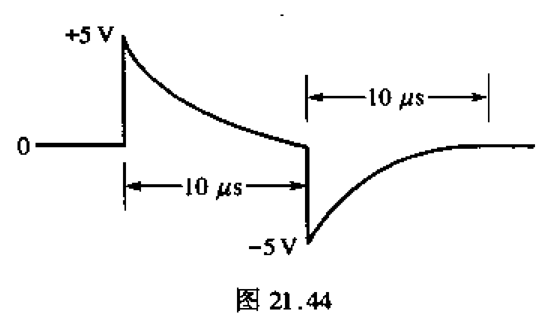


图 21.44

练习：如果图 21.43 中的脉冲宽度减小到 5 μs，画出输出电压。

例 21.10 微分器如图 21.45 所示,判断输出电压的波形。

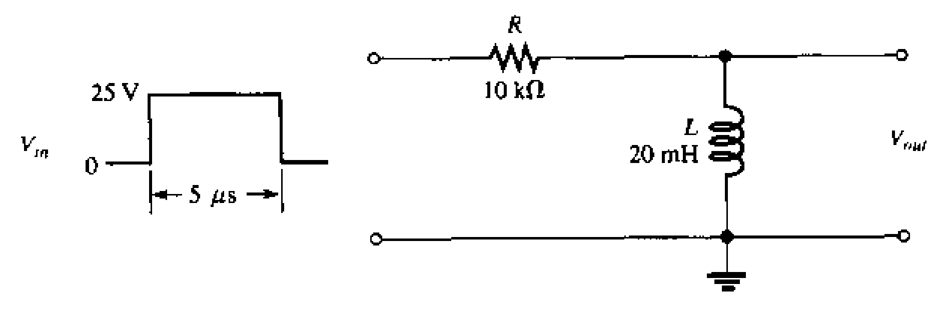


图 21.45

解:首先计算时间常数。

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{20\ \text{mH}}{10\ \text{k}\Omega} = 2\ \mu\text{s}$$

在脉冲的上升沿,电感电压立刻跳变到 +25 V。因为脉冲宽度是 5 μs,电感只在 2.5τ 内充电,所以利用指数增加的公式。

$$v_L = V_i e^{-t/\tau} = 25e^{-5\ \mu\text{s}/2\ \mu\text{s}} = 25e^{-2.5} = 25(0.082) = 2.05\ \text{V}$$

这就是脉冲宽度为 5 μs 的输入脉冲结束时电感的电压。

在下降沿,输出立刻从 +2.05 V 降为 −22.95 V(负向的 25 V 变化量)。完整的输出波形如图 21.46 所示。

练习:图 21.45 中,在脉冲结束时,为了满足输出电压降为 0 V,电阻 R 的阻值应是多少?

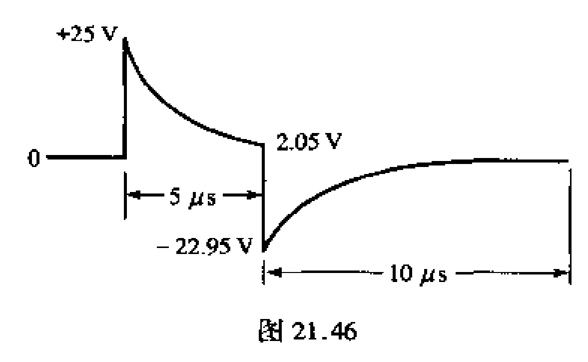


图 21.46

21.7 节练习

1. RL 微分器中,输出是通过哪一个部分获得的?
2. 在什么条件下,输出脉冲的波形最接近于输入的脉冲?
3. RL 微分器中,如果在 +10 V 的输入脉冲结束时电感电压降到 +2 V,那么在输入脉冲的下降沿处的响应,输出将达到的负值为多少?

21.8 时间(脉冲)响应和频率响应的关系

时间(脉冲)响应和频率响应之间存在着一定的关系。脉冲波形快速的上升沿和下降沿包括较高的频率成分。脉冲波形平坦的部分,也就是脉冲顶部,代表缓慢的变化或者较低的频率成分。脉冲波形的平均值是其直流分量。

学完本节后,读者应该能够:

- 阐述时间响应和频率响应的关系
- 根据脉冲的频率成分描述脉冲的波形
- 解释 RC 和 RL 积分器作为滤波器的原理
- 解释 RC 和 RL 微分器作为滤波器的原理
- 阐述上升时间和下降时间同频率之间关系的公式

频率特性和脉冲波形的频率成分之间的关系如图 21.47 所示。

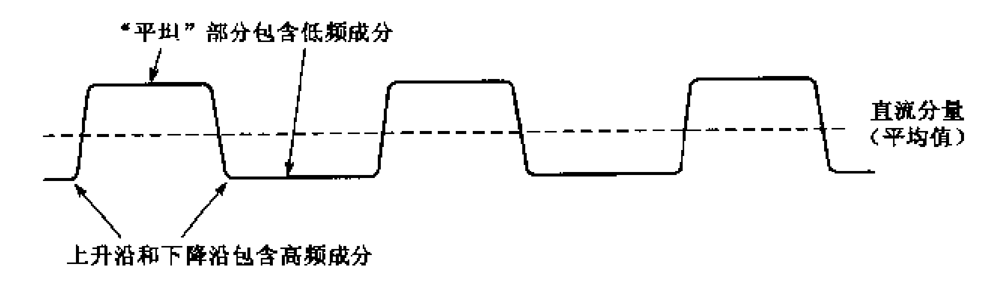


图 21.47　脉冲波形频率成分的一般关系

21.8.1　*RC* 积分器作为低通滤波器

前面已经介绍过，*RC* 积分器往往会按指数"钝化"输入脉冲的边缘。钝化发生在不同的位置，取决于时间常数对于脉冲宽度和周期的关系。边缘的钝化说明积分器往往会减少脉冲波形中较高频率的成分，如图 21.48 所示。

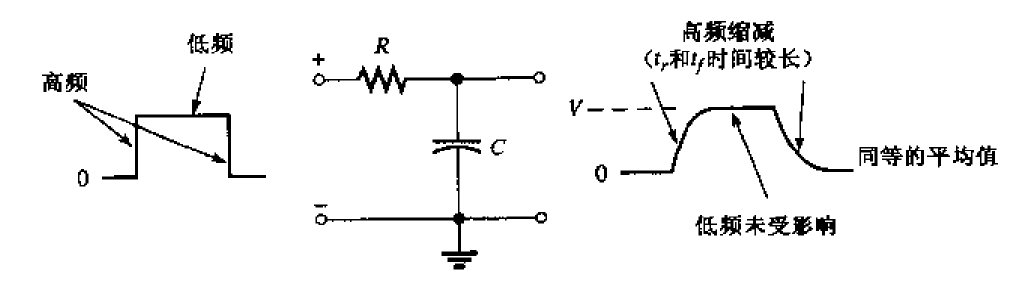


图 21.48　*RC* 积分器中时间和频率的响应关系(图示的是序列波形中的一个脉冲)

21.8.2　*RL* 积分器作为低通滤波器

正如 *RC* 积分器一样，*RL* 积分器也可用于基本的低通滤波器，因为电感 *L* 串联在输入和输出之间。感应电抗 X_L 对于低频而言很小，几乎不产生抗性。X_L 随着频率增加，因此在较高频率时，绝大部分的总电压加在电感 *L* 上，很少通过电阻 *R*，即输出。如果输入是直流，电感 *L* 视为短路($X_L=0$)。在高频时，电感 *L* 变成开路，如图 21.49 所示。

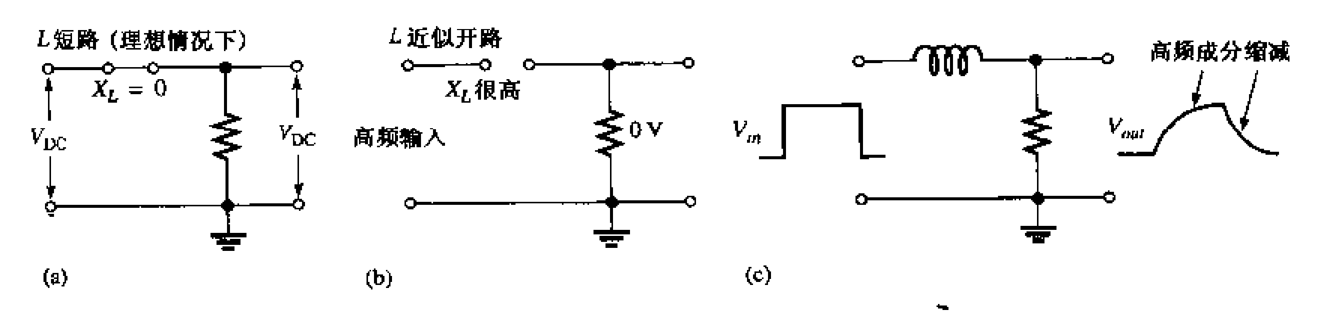


图 21.49　低通滤波器的作用

21.8.3　*RC* 微分器作为高通滤波器

前面已经介绍过，微分器往往使脉冲的平坦部分倾斜。因此，往往减少了脉冲波形中较低的频率成分。所以，微分器完全消除了输入的直流分量，产生一个平均值为零的输出。这个过程如图 21.50 所示。

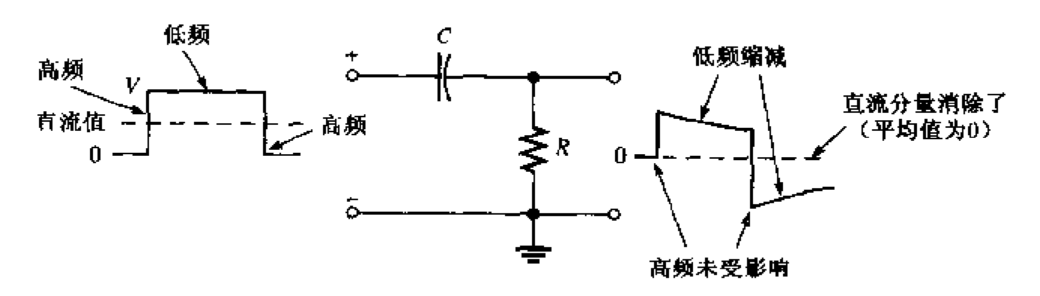


图 21.50 RC 微分器中时间和频率响应的关系(图示的是序列波形中的一个脉冲)

21.8.4 RL 微分器作为高通滤波器

又如 RC 微分器一样,RL 微分器也可用做基本的高通滤波器。因为电感 L 为输出端,相对于较高频率而言,低频率在电感上的电压较小。输入直流(线圈的电阻忽略)时,电感上的输出电压为 0 V。对于高频,大部分的输入电压都加在了线圈输出上(对于直流,$X_L=0$;对于高频,$X_L\cong$开路)。高通滤波器的过程如图 21.51 所示。

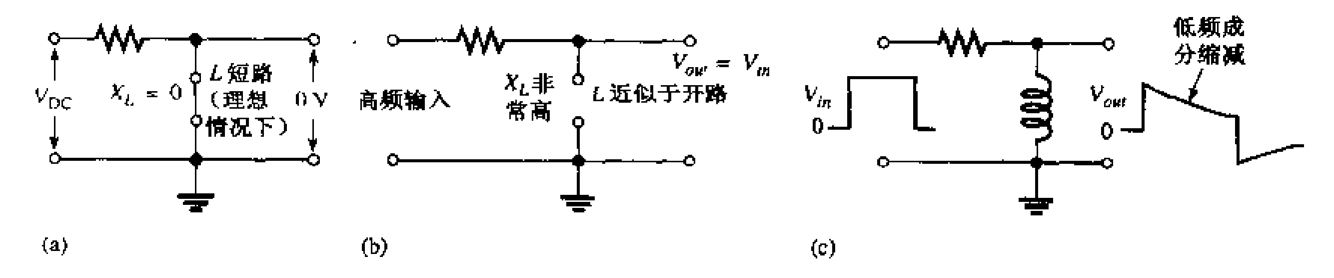


图 21.51 高通滤波器的过程

21.8.5 上升时间和下降时间同频率之间的公式

脉冲的快速转换(上升时间 t_r 和下降时间 t_f)和脉冲中最高频率 f_h 的公式如下:

$$t_r=\frac{0.35}{f_h} \tag{21.1}$$

该式同样适用于下降时间,最快的转换时间决定了脉冲波形中的最高频率。

整理式(21.1)可得出最高频率的公式,如下:

$$f_h=\frac{0.35}{t_r} \tag{21.2}$$

或者:

$$f_h=\frac{0.35}{t_f} \tag{21.3}$$

例 21.11 如果上升和下降时间等于 10 纳秒(10 ns),脉冲中含有的最高频率是多少?

解:

$$f_h=\frac{0.35}{t_r}=\frac{0.35}{10\times10^{-9}\,\text{s}}=0.035\times10^{9}\ \text{Hz}$$
$$=35\times10^{6}\ \text{Hz}=\mathbf{35\ MHz}$$

练习:如果 $t_r=10$ ns,$t_f=15$ ns,脉冲的最高频率是多少?

21.8 节练习

1. 积分器是哪种类型的滤波器?

2. 微分器是哪种类型的滤波器?
3. 脉冲波形的 $t_r = t_f = 1\ \mu s$,最高频率成分是多少?

21.9　故障检修

在本节中,带有脉冲输入的 *RC* 电路用来说明所采用的普通组件的故障。同样,这些概念很容易用于 *RL* 电路。

学完本节后,读者应该能够:

- 分析 *RC* 积分器和 *RC* 微分器的故障
- 认识电容开路的影响
- 认识电容泄漏的影响
- 认识电容短路的影响
- 认识电阻开路的影响

21.9.1　电容开路

如果 *RC* 积分器的电容开路,输出的波形和输入的一样,如图 21.52(a)所示。如果是微分器的电容开路,输出将是零,因为输出是由对地电阻获得的,如图 21.52(b)所示。

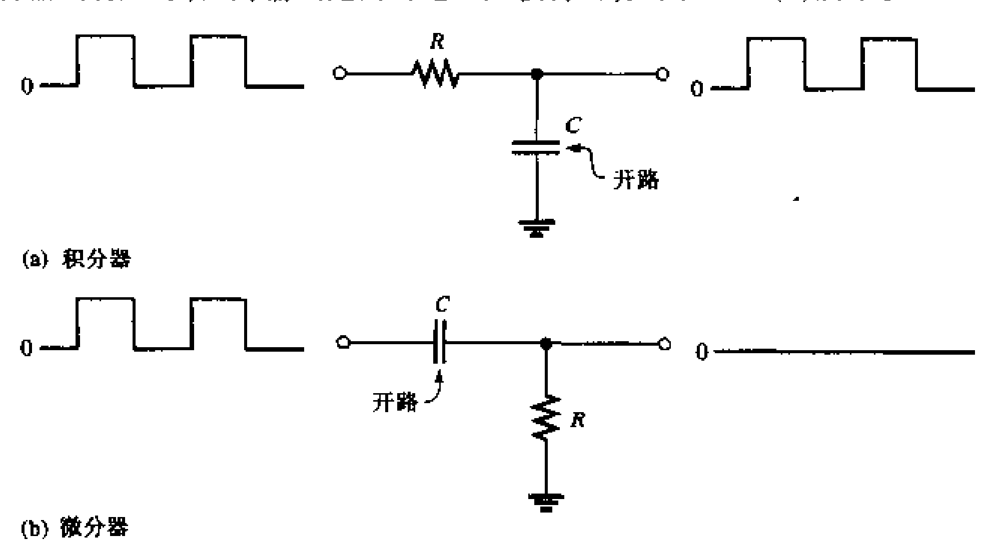


图 21.52　电容开路效应的图例

21.9.2　电容泄漏

如果 *RC* 积分器的电容开始泄漏,将发生三种情况:(a)时间常数因为泄漏阻抗会减小很多(从电容处可看成和电阻 *R* 并联);(b)输出电压的波形(通过电容 *C*)通过较短的充电时间,与正常值发生变化;(c)输出的幅度减小,因为电阻 *R* 和 R_{leak} 有效地构成一个分压器。这些结果如图 21.53(a)所示。

如果微分器中的电容开始泄漏,时间常数将会减少,就像积分器一样(二者都是简化 *RC* 串联电路)。电容达到完全充电时,输出电压(通过电阻 *R*)是根据 *R* 和 R_{leak} 构成的分压器得到的,如图 21.53(b)所示。

图 21.53 电容泄漏效应的图例

21.9.3 电容短路

如果 RC 积分器中的电容短路，输出接地，如图 21.54(a)所示。如果 RC 微分器中的电容短路，输出和输入一样，如图 21.54(b)所示。

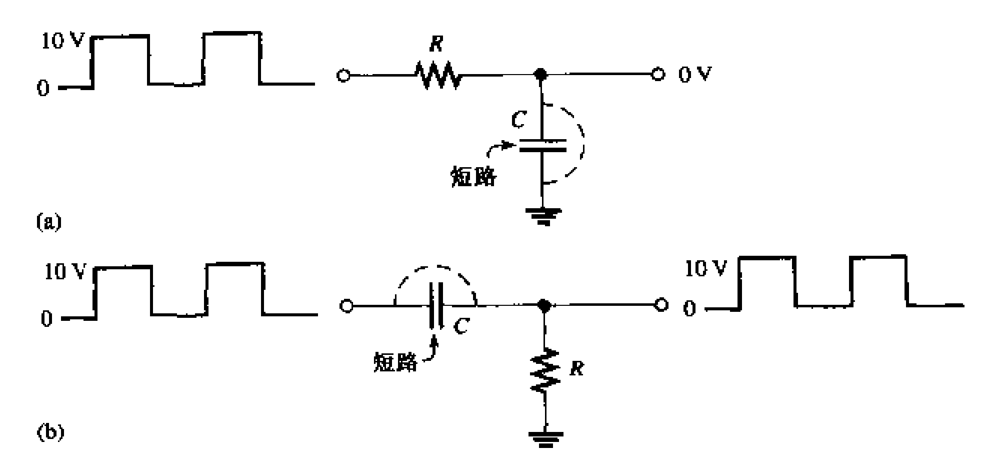


图 21.54 电容短路效应的图例

21.9.4 电阻开路

如果 RC 积分器中的电阻开路，电容没有放电通路，因此在理想状态下，将保持它的电荷。

在实际电路中，电荷将逐渐泄漏或者电容将通过连接到输出的测量仪器缓慢放电。这种情况如图 21.55(a)所示。

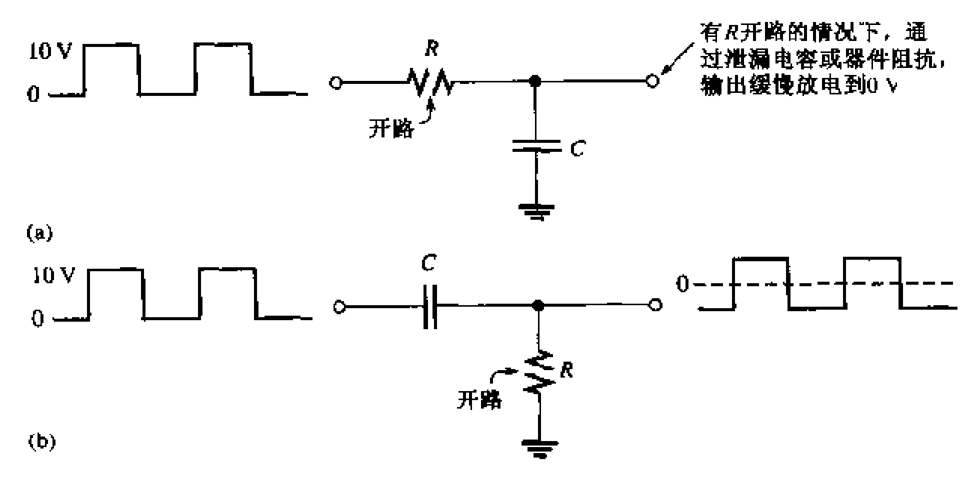


图 21.55　电阻开路效应的图例

如果微分器的电阻开路，除了直流电平以外，输出波形和输入一样，因为现在电容必须通过示波器中相当高的阻抗进行充电或者放电，如图 21.55(b)所示。

21.9 节练习

1. RC 积分器在输入方波时输出为零，有可能造成该结果的原因是什么？
2. 如果微分器中的电容短路，输入方波时，输出是什么？

技术实践

在技术实践中，要求构造并测试一个时间延迟的电路，提供 5 个可选开关的延迟时间。该电路可以选择一个 RC 积分器。输入是一个 5 V 的长持续时间的脉冲，且输出接入一个门限触发电路，在最初的脉冲发生后，选中的 5 个时间间隔中的任一个都可用于启动一部分系统的电源。

延时可选积分电路的原理图如图 21.56 所示。RC 积分器通过一个脉冲输入驱动，输出呈指数增加电压，用于在 3.5 V 电平触发一个门限电路，这个电路启动了一部分系统的电源。这个基本概念如图 21.57 所示。在该电路中，积分器的延迟时间定义为从输入脉冲的上升沿，到输出电压达到 3.5 V 的这个点之间的时间。给定的延迟时间列表如表 21.1 所示。

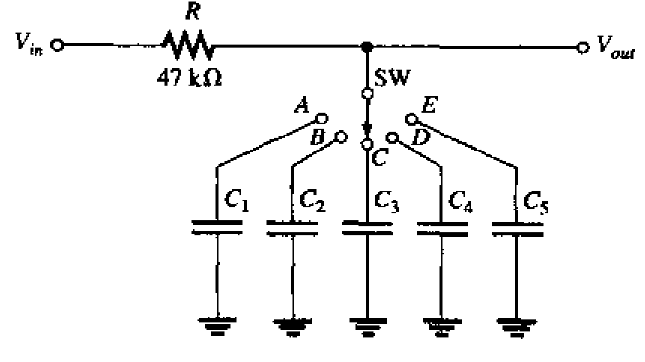


图 21.56　积分延时电路

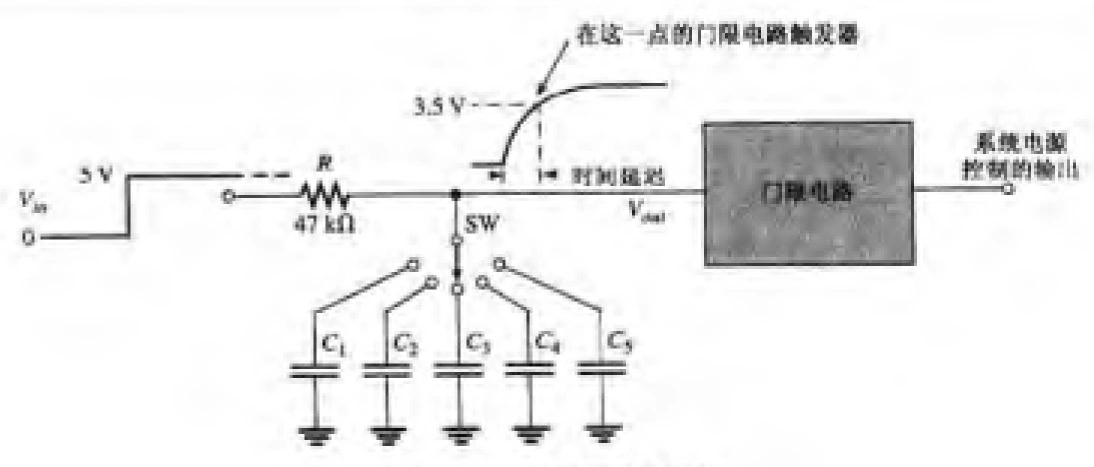


图 21.57 延时应用的图例

表 21.1

开关的位置	延迟时间
A	10 ms
B	25 ms
C	40 ms
D	65 ms
E	85 ms

电容值

为了使提供的延迟时间误差在 10%之内,判断每个电容值是多少。从下列清单的标准值中选取(单位均为 μF):0.1,0.12,0.15,0.18,0.22,0.27,0.33,0.39,0.47,0.56,0.68,0.82,1.0,1.2,1.5,1.8,2.2,2.7,3.3,3.9,4.7,5.6,6.8,8.2。

电路连接

参见图 21.58。在电路板上,*RC* 积分器的各部分连接如图 21.56 所示,但没有互相连通。

- 按照圆圈内的数字,逐点连接使其将电路正确连接在板上。
- 如何连接仪器来测量电路,适当地用圆圈内的数字来说明。

测试过程

- 指定函数发生器的函数、幅度和最小频率,用以测试图 21.58 中所有输出的延迟时间。
- 指定示波器设定的最小值,用以测量图 21.58 中每个给定的延迟时间。

技术实践练习

1. 给图 21.57 中的电路增加一个额外的延迟时间,充电值将达到多少?
2. 100 ms 额外的延迟时间需要延时电路。求电容值该增加多少?

小结

- *RC* 积分电路中,输出电压是通过电容获得的。
- *RC* 微分电路中,输出电压是通过电阻获得的。
- *RL* 积分电路中,输出电压是通过电阻获得的。
- *RL* 微分电路中,输出电压是通过电感获得的。

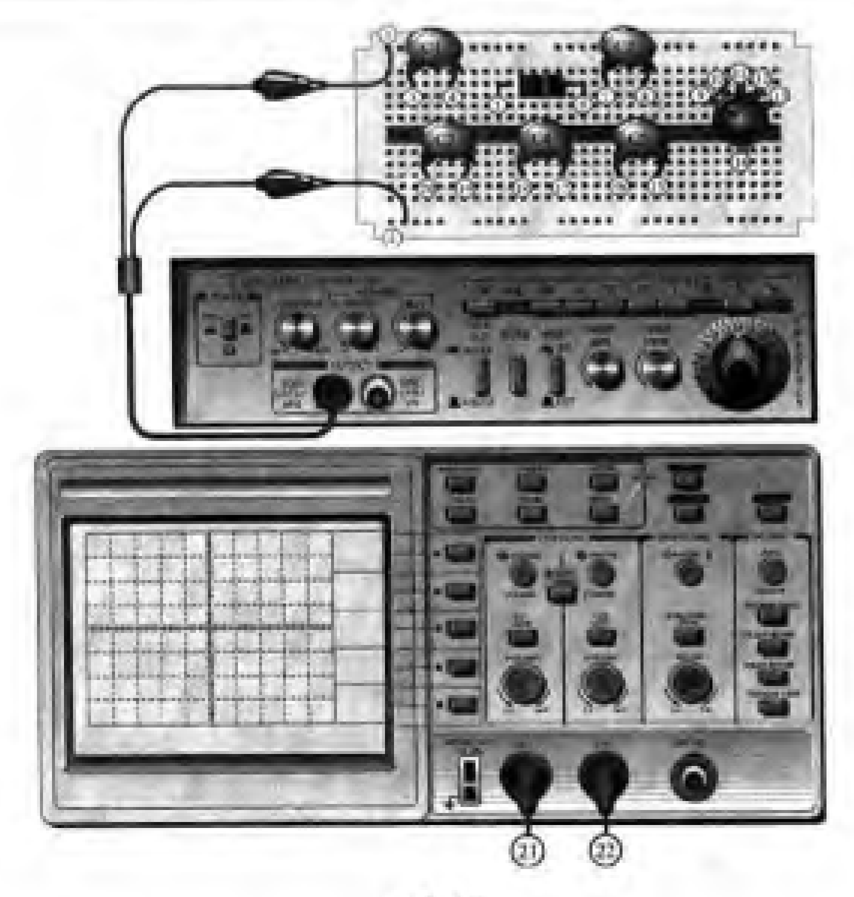


图 21.58

- 积分器中，输入脉冲的宽度（t_W）远小于暂态时间时，输出电压达到一个稳定的电平，该电平等于输入平均值。
- 积分器中，输入脉冲的宽度远大于暂态时间时，输出电压的波形和输入的一样。
- 微分器中，输入脉冲的宽度远小于暂态时间时，输出电压的波形和输入的一样，但是平均值为零。
- 微分器中，输入脉冲的宽度远大于暂态时间时，输出的电压由在输入脉冲的主要边缘和长尾边缘时产生的窄的正向的和负向的毛刺构成。
- 脉冲波形的上升沿和下降沿包含较高的频率成分。
- 脉冲的平坦部分包含较低的频率成分。

主要术语

直流分量：脉冲波形的平均值。

微分器：产生的输出是输入的数学微分的电路。

积分器：产生的输出是输入的数学积分的电路。

脉冲响应：在电子电路中，给定输入脉冲对电路的作用。

稳定状态：最初的暂态时间之后，电路的平衡状态。

时间常数：由电阻 R 和电容 C，或者由电阻 R 和电感 L 的值构成的固定时间的间隔，决定了电路响应的时间。

暂态时间：大约等于五倍时间常数的间隔。

公式

21.1　$t_r = \dfrac{0.35}{f_h}$　　上升时间

21.2 $f_h = \frac{0.35}{t_r}$ 上升时间相对应的最高频率

21.3 $f_h = \frac{0.35}{t_f}$ 下降时间相对应的最高频率

自测题

1. *RC* 积分器的输出是通过____获得的。

   (a) 电阻 (b) 电容 (c) 电源 (d) 电感

2. 幅度是 10 V,脉冲宽度等于一个时间常数的输入脉冲连接到 *RC* 积分器,电容充电达到:

   (a) 10 V (b) 5 V (c) 6.3 V (d) 3.7 V

3. 幅度是 10 V,脉冲宽度等于一个时间常数的输入脉冲连接到 *RC* 微分器,电容充电达到:

   (a) 6.3 V (b) 10 V (c) 0 V (d) 3.7 V

4. 在 *RC* 积分器中,输出的脉冲与输入的脉冲最接近的是以下哪种情况?

   (a) τ 远大于脉冲的宽度 (b) τ 等于脉冲的宽度

   (c) τ 小于脉冲的宽度 (d) τ 远小于脉冲的宽度

5. 在 *RC* 微分器中,输出的脉冲与输入的脉冲最接近的是以下哪种情况?

   (a) τ 远大于脉冲的宽度 (b) τ 等于脉冲的宽度

   (c) τ 小于脉冲的宽度 (d) τ 远小于脉冲的宽度

6. 微分器输出电压中,正向部分和负向部分相等是以下哪种情况?

   (a) $5\tau < t_W$ (b) $5\tau > t_W$ (c) $5\tau = t_W$ (d) $5\tau > 0$ (d) (a)(c)两者 (e) (b)(d)两者

7. *RL* 积分器的输出是通过____获得的。

   (a) 电阻 (b) 电感 (c) 电源 (d) 电容

8. *RL* 积分器中最大的可能电流是:

   (a) $I = V_p/X_L$ (b) $I = V_p/Z$ (c) $I = V_p/R$

9. *RL* 微分器中的电流达到其最大可能电流是以下哪种情况?

   (a) $5\tau = t_W$ (b) $5\tau < t_W$ (c) $5\tau > t_W$ (d) $\tau = 0.5t_W$

10. 如果把时间常数相等的一个 *RC* 和一个 *RL* 微分器放置在一起,并且给两个微分器输入同样的脉冲,那么:

    (a) *RC* 有最宽的脉冲输出

    (b) *RL* 有最窄的毛刺输出

    (c) 一个输出呈指数增大,另一个输出呈指数衰减

    (d) 观察输出波形,难以区分微分器

故障检修测验

参见图 21.60

1. 如果 R_2 开路,那么输出电压的幅度将:

   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

2. 如果 C 值变大一倍,那么时间常数将:

   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

3. 如果 R_1 的值减少,那么输出电压的幅度将:

   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

参见图 21.63

4. 如果 R_3 的值减少,那么输出电压的幅度将:

   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持不变

5. 如果输入的是稳定直流电压,那么输出的电压将:
   (a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变
6. 如果 R_1 用 3.3 kΩ 代替 2.2 kΩ,那么时间常数将:
   (a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

参见图 21.66

7. 如果 L 减少,那么输出的上升时间将:
   (a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变
8. 如果输入脉冲的宽度增加到 5 ms,那么输出脉冲的幅度将:
   (a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

参见图 21.68

9. 如果 R_1 开路,那么输出的最大幅度将:
   (a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变
10. 如果 R_2 短路,那么输出的最大幅度将:
   (a) 增大　(b) 减小　(c) 保持不变

习题(奇数编号习题的答案在本书最后)

21.1 节　*RC* 积分器

1. 积分电路中,$R = 2.2$ kΩ 和 $C = 0.047$ μF 串联,求时间常数是多少?
2. 串联 RC 电路的值如下,求每个积分电路中的电容达到完全充电需要的时间是多少?
   (a) $R = 56$ Ω, $C = 47$ μF　　(b) $R = 3300$ Ω, $C = 0.015$ μF
   (c) $R = 22$ kΩ, $C = 100$ pF　　(d) $R = 5.6$ MΩ, $C = 10$ pF

21.2 节　*RC* 积分器的单脉冲响应

3. RC 积分器接入一个 20 V 的脉冲,脉冲宽度等于一个时间常数。在脉冲期间,电容充电的电压将达到多少?假设最初电容未充电。
4. 脉冲宽度 t_W 等于以下值的时候,重复完成第 3 题。
   (a) 2τ　(b) 3τ　(c) 4τ　(d) 5τ
5. 当 5τ 远小于一个 10 V 输入方波脉冲的宽度时,画出积分器输出电压的大致波形。当 5τ 远大于脉冲的宽度时,重复完成上述问题。
6. RC 积分器输入一个单脉冲,如图 21.59 所示,求输出电压是多少?如果输入的是脉冲序列,该电路将经过多长时间达到稳定状态?

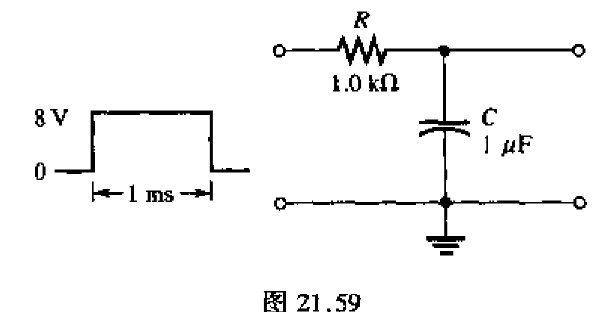


图 21.59

7. (a) 图 21.60 中的 τ 是多少?　(b) 画出输出电压。

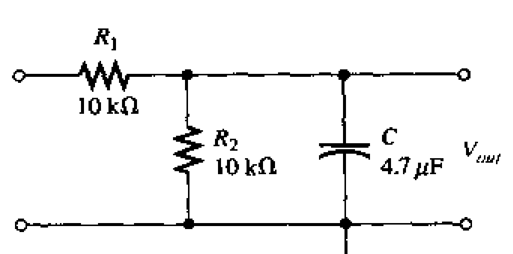


图 21.60

21.3节 *RC* 积分器的序列脉冲响应

8. 画出图 21.61 中积分器的输出电压,并表示出最大电压。

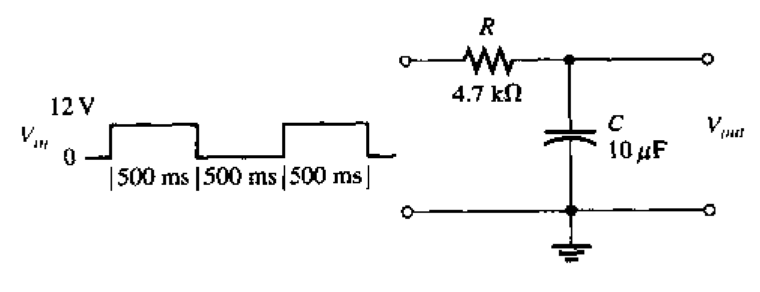


图 21.61

9. 积分器连接一个幅度为 1 V,频率为 10 kHz,占空比为 25%的输入波形,$\tau = 25\ \mu s$。画出最初三个脉冲的输出电压。假设电容 C 未充电。
10. *RC* 积分输入的方波如图 21.62 所示,求稳态输出的电压是多少?

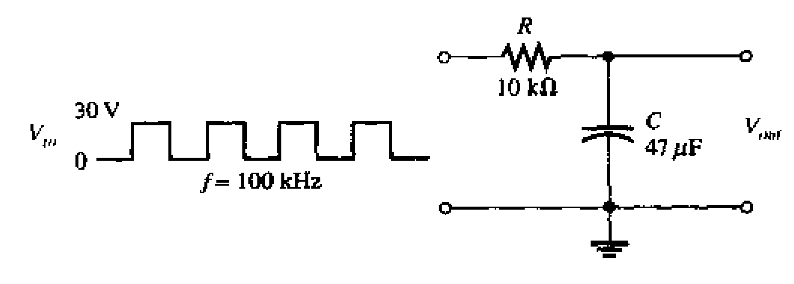


图 21.62

21.4节 *RC* 微分器的单脉冲响应

11. 如果题中是 *RC* 微分器,重复完成第 5 题。
12. 重组图 21.59 中的电路为微分器,重复完成第 6 题。
13. (a)图 21.63 中的 τ 是多少? (b)画出输出电压。

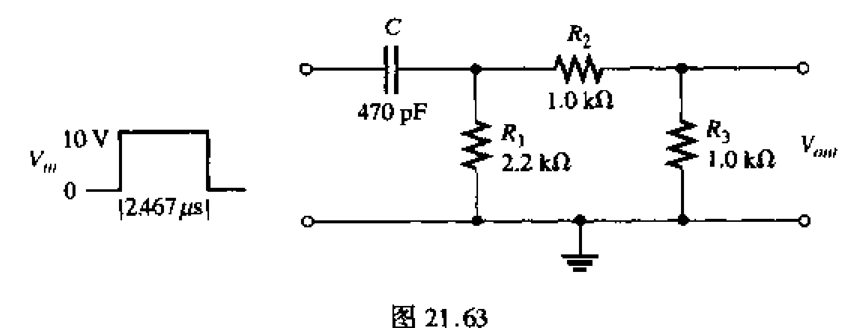


图 21.63

21.5节 *RC* 微分器的序列脉冲响应

14. 画出图 21.64 中微分器的输出,并表示出最大电压。

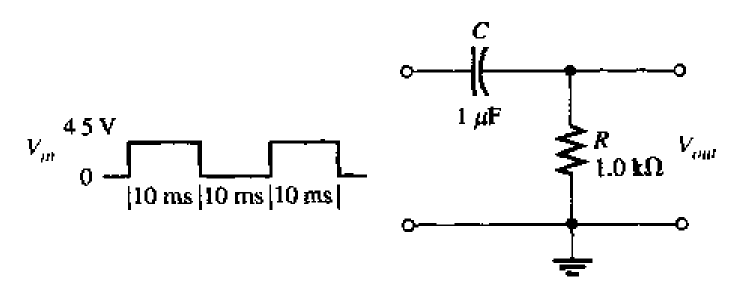


图 21.64

15. 微分器连接一个方波输入脉冲，如图 21.65 所示，求稳定状态的输出电压是多少？

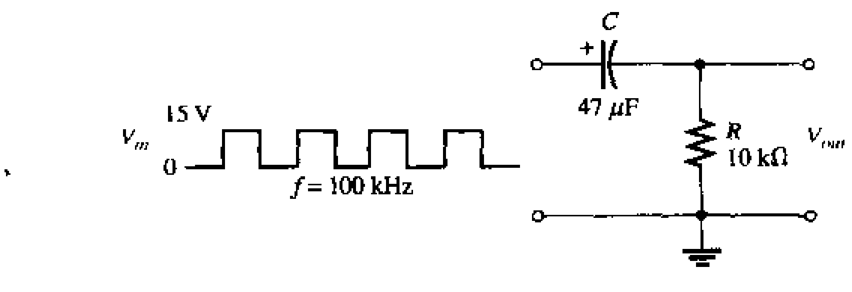


图 21.65

21.6 节　RL 积分器的脉冲响应

16. 如图 21.66 所示，求电路的输出电压是多少？接入的单位输入脉冲如图中所示。

17. 画出图 21.67 中积分器的输出电压，并表示出最大电压。

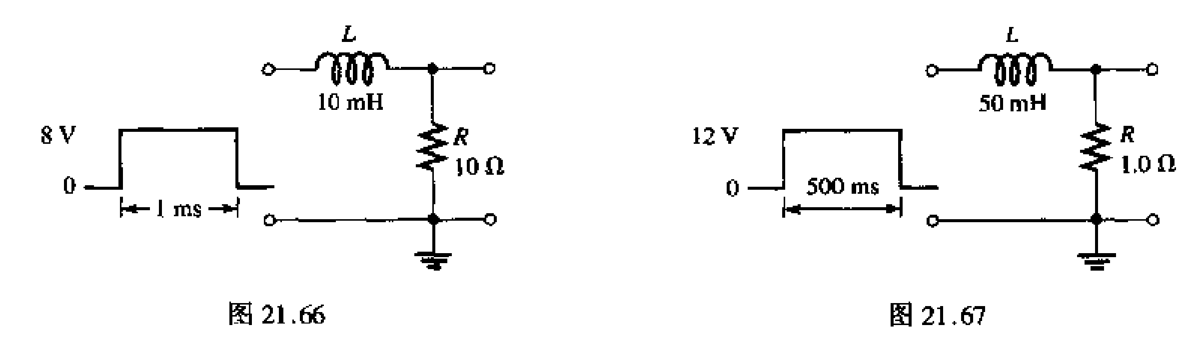


图 21.66　　图 21.67

18. 求图 21.68 中的时间常数是多少？该电路是积分器还是微分器？

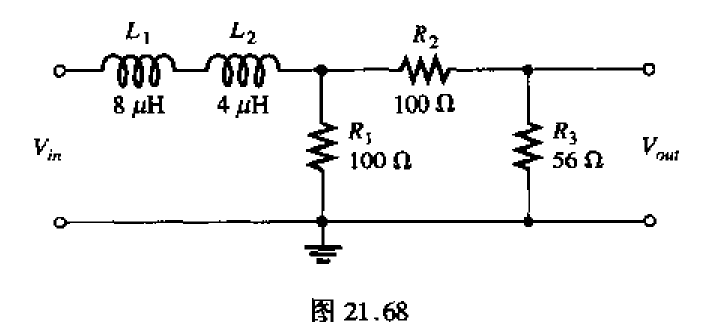


图 21.68

21.7 节　RL 微分器的脉冲响应

19. (a)图 21.69 中的时间常数是多少？　(b)画出输出电压。

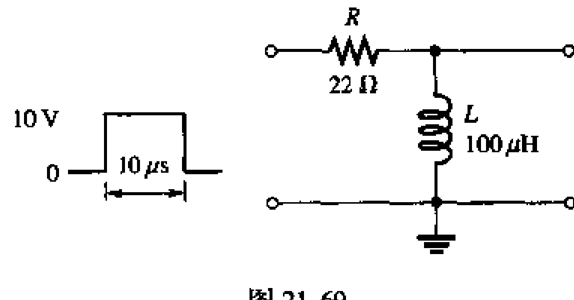


图 21.69

20. 如果电路接入一个波形为 $t_W = 25\ \mu s$, $T = 60\ \mu s$ 的周期脉冲，如图 21.69 所示，画出输出波形。

21.8节 时间(脉冲)响应和频率响应的关系

21. 时间常数 $\tau = 10\ \mu s$ 的积分器,输出中最高的频率成分是多少?假设 $5\tau < t_W$。
22. 某一脉冲波形的上升时间是 55 ns,下降时间是 42 ns,波形中的最高频率成分是多少?

21.9节 故障检修

23. 电路如图 21.70(a)所示,对于图 21.70(b)到图 21.70(d)中的各组波形,判断最可能出现的故障。V_{in} 是一个周期为 8 ms 的方波。

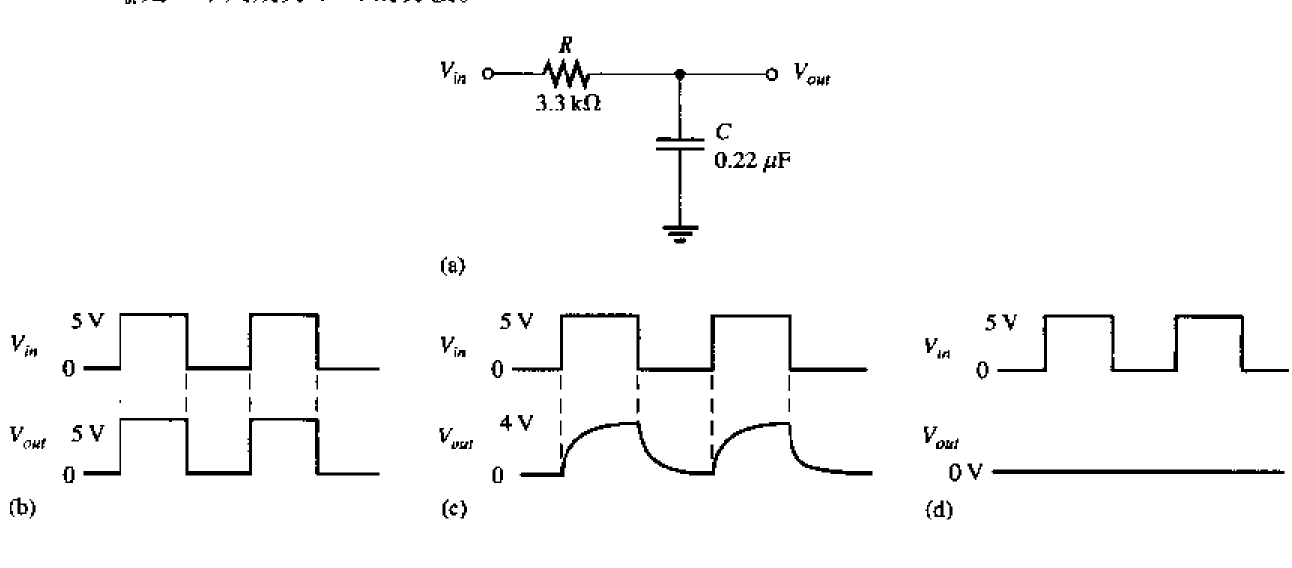


图 21.70

24. 电路如图 21.71(a)所示,对于图 21.71(b)到图 21.71(d)中的各组波形,判断最可能出现的故障。V_{in} 是一个周期为 8 ms 的方波。

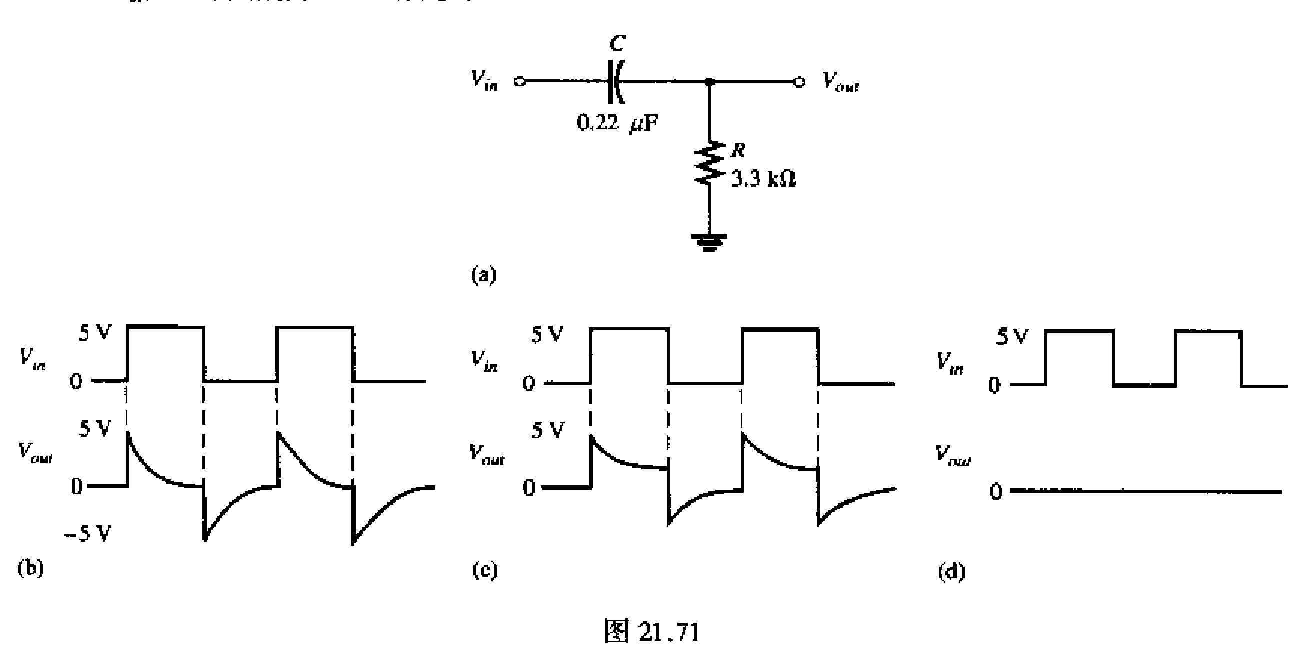


图 21.71

EWB/Multisim 故障检修

完成以下问题需要使用本书附带的 EWB/Multisim 的光盘。

25. 打开文件 P21.25,判断是否有故障。如果是,找出故障。
26. 打开文件 P21.26,判断是否有故障。如果是,找出故障。

27. 打开文件 P21.27,判断是否有故障。如果是,找出故障。
28. 打开文件 P21.28,判断是否有故障。如果是,找出故障。

答案

21.1 节　RC 积分器

1. 串联 RC 积分电路的输出是通过电容获得的。
2. 输入的电压使得电容充电。输入的短路使得电容放电。

21.2 节　RC 积分器的单脉冲响应

1. 为了积分器的输出可以达到振幅,需要 $5\tau \leqslant t_W$。
2. $V_{out(max)} = 630$ mV; $t_{disch} = 51.7$ ms。
3. 如图 21.72 所示。
4. 不是,电容不能完全充电。
5. $5\tau \ll t_W$(5τ 远小于 t_W)时,输出波形近似于输入的波形。

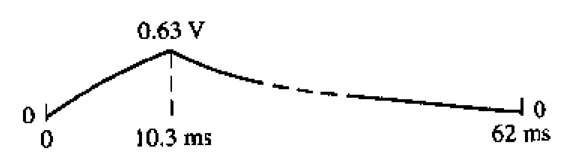


图 21.72

21.3 节　RC 积分器的序列脉冲响应

1. 当 $5\tau \leqslant t_W$ 且 5τ 小于等于脉冲持续时间时,电容完全充电和放电。
2. 当 $\tau \ll t_W$ 时,输出近似于输入。
3. 暂态时间。
4. 稳态响应是在暂态时间之后的响应。
5. 输出的平均值等于输入电压的平均值。

21.4 节　RC 微分器的单脉冲响应

1. 如图 21.73 所示。
2. 当 $5\tau >> t_W$ 时,输出近似于输入。
3. 输出出现正向毛刺和负向毛刺。
4. V_R 将达到 -10 V。

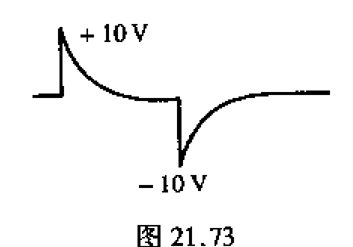


图 21.73

21.5 节　RC 微分器的序列脉冲响应

1. 当 $5\tau \leqslant t_W$ 且 5τ 小于等于脉冲持续时间时,电容完全充电和放电。
2. 输出出现正向毛刺和负向毛刺。
3. 平均值为 0 V。

21.6 节　RL 积分器的脉冲响应

1. 输出是通过电阻获得的。
2. 当 $5\tau \leqslant t_W$ 时,输出达到输入的幅度。
3. 当 $5\tau \ll t_W$ 时,输出的波形近似于输入的波形。

21.7 节　RL 微分器的脉冲响应

1. 输出是通过电感获得的。
2. 当 $5\tau >> t_W$ 时,输出的波形近似等于输入的波形。
3. V_L 将达到 -8 V。

21.8 节　时间(脉冲)响应和频率响应的关系

1. 积分器可作为低通滤波器。

2. 微分器可作为高通滤波器。
3. f_{max} = 350 kHz。

21.9 节 故障检修

1. 开路电阻或者短路电容会造成 0 V 输出。
2. 如果电容 C 短路,输出将和输入一样。

技术实践

1. 电容相加,开关在 6 个位置之间改变。
2. C_6 = 100 ms/[(1.204)(47 kΩ)] = 1.77 μF(通常用 1.8 μF)。

实例相关练习

21.1 8.65 V
21.2 24.7 V
21.3 1.08 V
21.4 如图 21.74 所示
21.5 892 mV
21.6 电阻器大约为 50 Ω
21.7 20 V
21.8 2.5 kΩ
21.9 如图 21.75 所示
21.10 20 kΩ
21.11 23.3 MHz

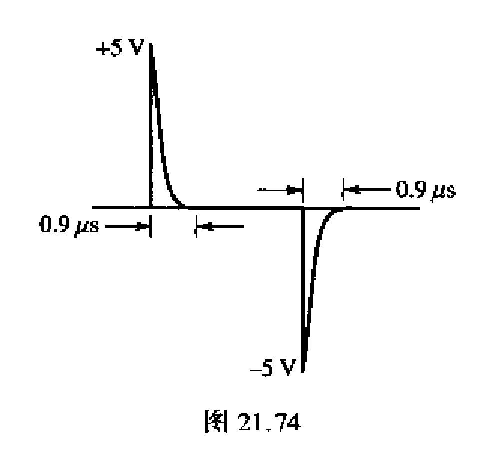


图 21.74

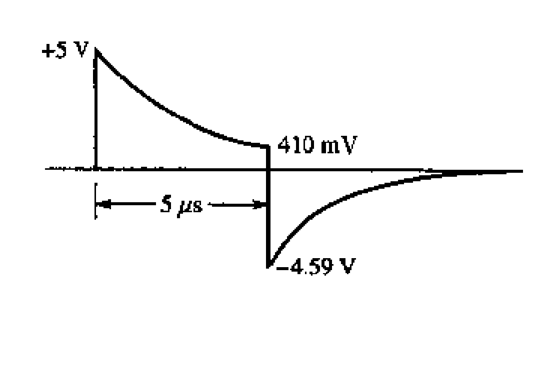


图 21.75

自测题

1.(b) 2.(c) 3.(a) 4.(d) 5.(a) 6.(e) 7.(a) 8.(c) 9.(b) 10.(d)

故障检修测验

1.(b) 2.(a) 3.(c) 4.(a) 5.(b) 6.(a) 7.(a) 8.(a) 9.(c) 10.(a)

第 22 章　电力应用中的多相系统

引言

前面各章所涉及的交流分析部分只考虑了单相正弦信号源的情况。第 11 章讲述了正弦电压是如何通过一个导体在磁场中以恒定速率旋转来产生的，并介绍了交流发电机的基本概念。

本章主要讨论多相正弦发电机，多相系统在电力应用中的优点，以及三相电路的多种连接类型和功率测量方法。

本章目标

- 描述一台基本多相设备
- 详述多相系统在电力应用中的优点
- 分析三相电源的结构
- 分析带三相负载的三相电源
- 详述三相系统的功率测量方法

主要术语

- 转子
- 多相
- 交流发电机
- 励磁绕组
- 定子
- 平衡负载
- 相电压(V_θ)
- 相电流(I_θ)
- 线电流(I_L)
- 线电压(V_L)

相关网络资源

关于学习本章的辅助材料，请访问 http://www.prenhall.com/floyd。

22.1　基本多相设备

多相电源同时产生多个正弦交流电压，除有确定的相位差外，其他是完全一致的，这是由复合绕组在磁场中旋转而形成的。同理，多相电动机的运转则需要多相正弦电压作为输入来完成。

学习完本节之后，读者应该能够：

- 描述一台基本多相设备
- 详述一台基本二相发电机
- 详述一台基本三相发电机
- 描述一台三相发电机的结构
- 描述一台基本三相感应电动机

22.1.1 基本二相发电机

图 22.1(a)所示为发电机在一台基本单相发电机上添加另一组独立的电枢绕组，且两个绕组间成 90°角。由于两个绕组固定在同一个转子上，因此以相同的速率旋转。在旋转方向上绕组 A 超前绕组 B 90°。当它们旋转时，便产生了两个相位相差 90°的正弦感应电压，如图 22.1(b)所示。

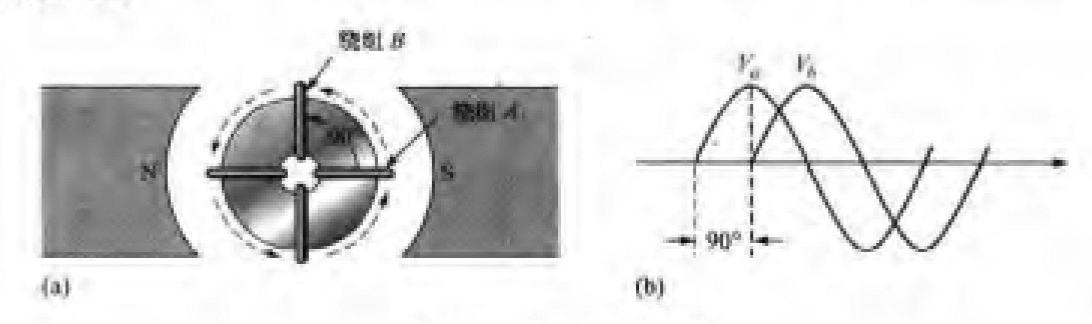


图 22.1 基本二相发电机

22.1.2 基本三相发电机

图 22.2(a)所示为一台带有三组独立电枢绕组的多相发电机，这三组绕组绕在同一个转子上且依次间隔 120°。这种构造的发电机可以产生出三个相角彼此相差 120°的正弦交流电压，如图 22.2(b)所示。

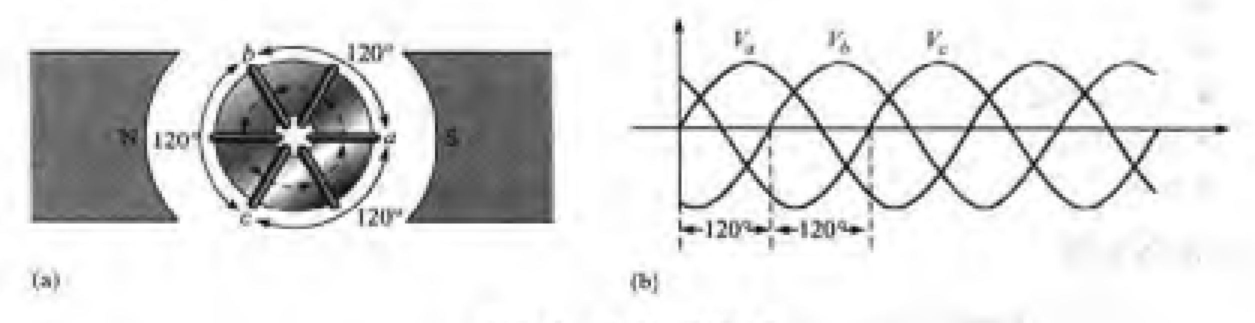


图 22.2 基本三相发电机

22.1.3 实际的三相发电机

正弦交流电压是由导体在磁场中旋转而产生的，交流发电机(交流机)就是依据这个原理工作的。许多交流发电机的构造与前面所述的有所差别，但基本原理是相同的。

图 22.3 所示为一台基本的双极性、三相发电机。实际发电机的结构大多数都是这样的。如图中所示，不再是在一个固定位置放置一块永久磁铁，而代之以一种旋转式的电磁铁。这种电磁铁只有缠绕在转子上的绕组中通过直流电流(I_F)时才会被磁化，故称这类绕组为励磁绕组。直流电流是通过电刷和滑环组件与外部电源相连来提供的。发电机外部的固定部分称为定子。在定子的内周放置了三组绕组，彼此间隔 120°。当磁场旋转时，便在这些绕组中产生了三相感应电压，如图 22.2(b)所示。

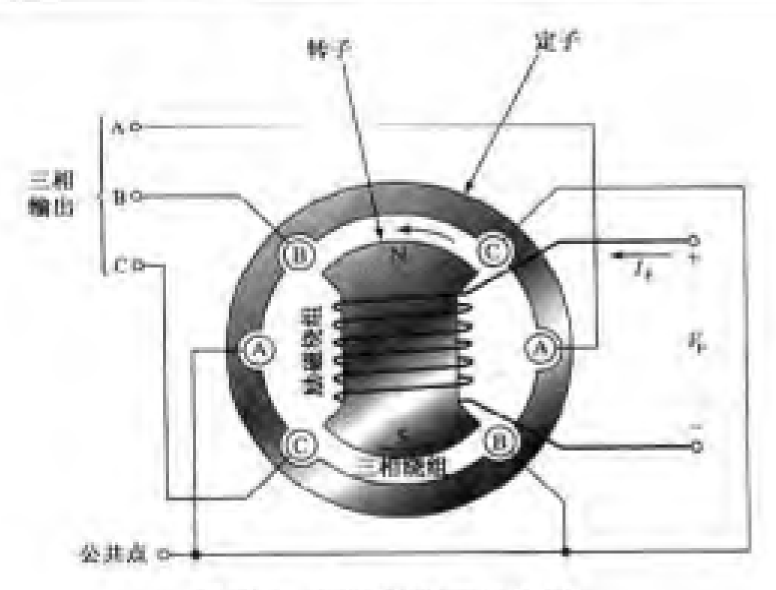


图22.3　基本双极性三相发电机

22.1.4　基本三相电动机

最常见的交流电动机就是三相感应电动机。"鼠笼式"感应电动机的基本组成包括一个带有定子绕组的定子和一个转子组合体，而转子组合体是由一个柱形金属棒构成的。图22.4所示为一台电动机的端视图。

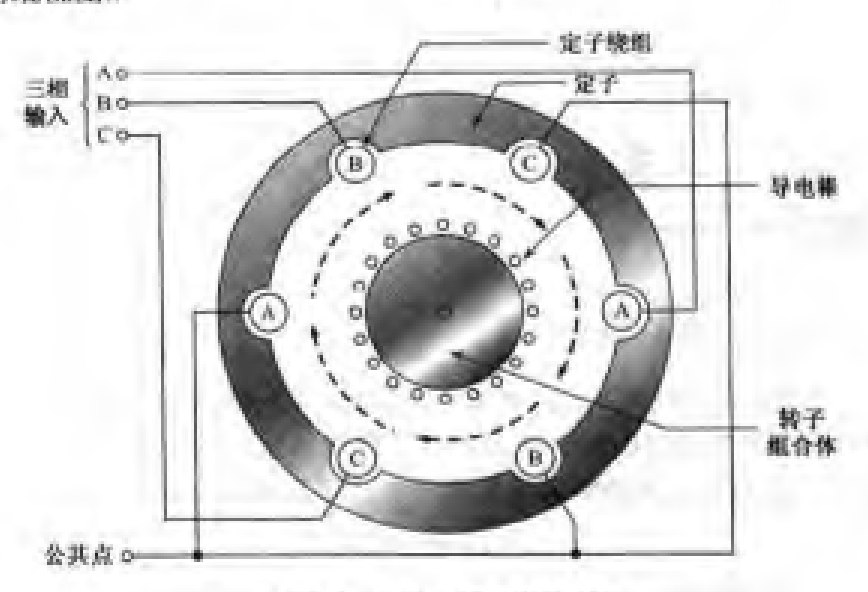


图22.4　基本三相感应电动机

当定子绕组上加上三相电压时，一个旋转的磁场便产生了。随着磁场的旋转，转子中的导电棒会产生感应电流。感应电流和磁场的相互作用所产生的力使得转子跟着旋转。

22.1节练习

1. 描述交流发电机的基本原理。
2. 一台双极性单相发电机的转速为400 rps(转/秒)，则其频率为多少？
3. 在一台三相交流机中需要几个电枢绕组？

22.2 多相发电机在电力系统中的应用

在本节中所讨论的是多相发电机在电力传输上相比于单相设备的几个优点。

学习完本节之后,读者应该能够:

- 论述多相发电机在电力应用中的优点
- 解释铜线的优点
- 比较单相、双相和三相系统中的铜线的优点
- 解释恒定功率的优点
- 解释一个固定旋转磁场的优点

22.2.1 铜线的优点

使用多相发电机时,用于从发电机到负载间进行电流传送的铜线尺寸比单相发电机有所减少。

单相系统 图 22.5 所示为一台单相发电机与一个阻性负载相连的简化示意图。图中线圈符号表示的是发电机的绕组。

例如,假设绕组中所产生的单相正弦感应电压作用于一个 60 Ω 的负载上,参见图 22.6。则通过负载的电流为:

$$\boldsymbol{I}_{RL}=\frac{120\angle 0^\circ\ \mathrm{V}}{60\angle 0^\circ\ \Omega}=2\angle 0^\circ\ \mathrm{A}$$

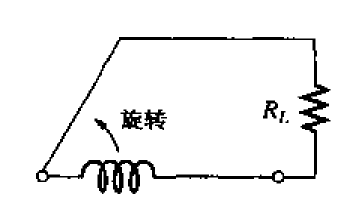


图 22.5 一台单相发电机与一个阻性负载相连的简化示意图

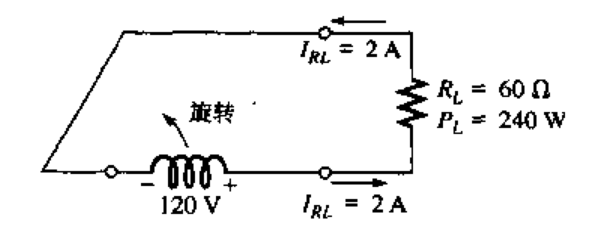


图 22.6 单相系统例题

从发电机传送到负载的总电流为 2∠0° A。这意味着来回两根载流电线每一根流过的电流都为 2 A,因此铜线总截面所通过的总电流为 4 A。(铜线总截面是一种量度,代表所需电线的总量,电线总量是根据与其直径有关的物理尺寸确定的。)则总负载功率为:

$$P_{L(tot)}=I_{RL}^2R_L=240\ \mathrm{W}$$

双相系统 图 22.7 所示为一台双相发电机与两个 120 Ω 的负载电阻相连的简化示意图。图中的 A 和 B 两个线圈成 90°,表示发电机的两个电枢绕组相隔 90°。为与前面单相系统等效,需要将两个 120 Ω 的电阻并联,从而得到 60 Ω 的等效电阻。

如图 22.8(a)所示,加在负载 R_{L1} 两端的电压为 120∠0° V,加在负载 R_{L2} 两端的电压为 120∠90° V,则通过 R_{L1} 的电流为:

$$\boldsymbol{I}_{RL1}=\frac{120\angle 0^\circ\ \mathrm{V}}{120\angle 0^\circ\ \Omega}=1\angle 0^\circ\ \mathrm{A}$$

通过 R_{L2} 的电流为:

$$\boldsymbol{I}_{RL2}=\frac{120\angle 90^\circ\ \mathrm{V}}{120\angle 0^\circ\ \Omega}=1\angle 90^\circ\ \mathrm{A}$$

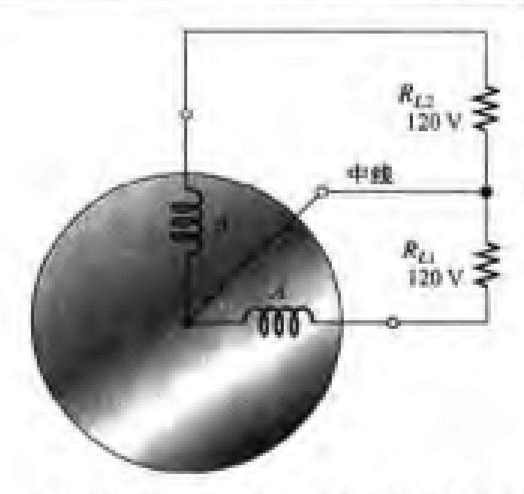


图 22.7　一台双相发电机且每一相与一个 120 Ω 的负载相连

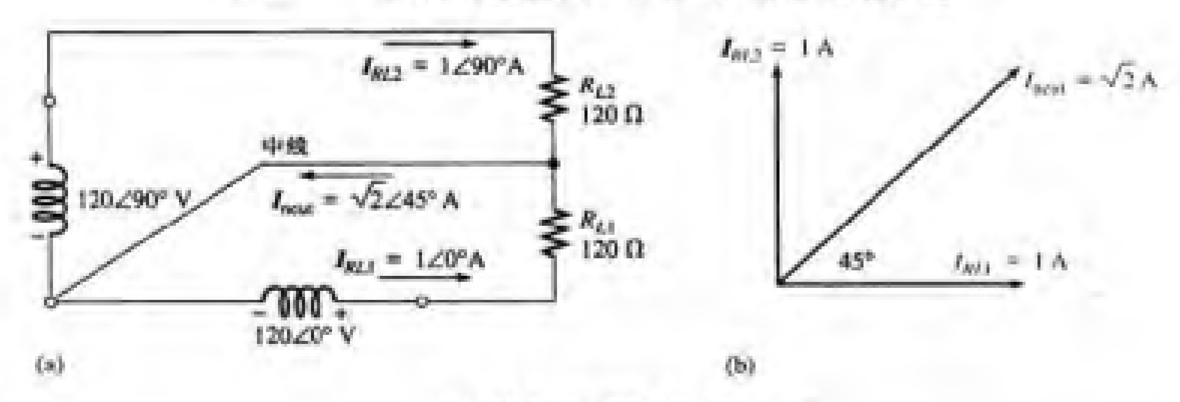


图 22.8　双相系统示例

注意图中两个负载电阻都分别与公共端或中线相连，中线为电流提供了回流路径。因为两个负载电流的相位差为 90°，所以通过中线的电流（I_{neut}）等于两个负载电流的相量和。

$$I_{neut} = \sqrt{I_{RL1}^2 + I_{RL2}^2} = \sqrt{2}\text{ A} = 1.414\text{ A}$$

图 22.8(b)所示为双相系统中的电流相量图。

在这个系统中需要三根电线为流入/流出负载的电流提供流通路径。其中有两根电线上流过的电流为 1 A，而中线上流过的电流为 1.414 A。铜线总截面通过的电流为 1 A + 1 A + 1.414 A = 3.414 A。在传输相同负载功率的条件下，双相系统所需铜线总截面要少于单相系统。

$$P_{L(tot)} = P_{RL1} + P_{RL2} = I_{RL1}^2 R_{L1} = I_{RL2}^2 R_{L2} = 120\text{ W} + 120\text{ W} = 240\text{ W}$$

三相系统　图 22.9 所示为一台三相发电机与三个 180 Ω 阻性负载相连的简化示意图。为与前面单相系统等效，需要将三个180 Ω 的电阻并联，从而得到 60 Ω 的等效电阻。线圈表示的是彼此间隔 120°的发电机电枢绕组。

如图 22.10(a)所示，加在负载 R_{L1} 两端的电压为 120∠0° V，加在负载 R_{L2} 两端的电压为 120∠120° V，而加在负载 R_{L3} 两端的电压为120∠−120° V，则从各绕组流向其对应负载的电流如下：

$$I_{RL1} = \frac{120\angle 0^\circ\text{ V}}{180\angle 0^\circ\ \Omega} = 667\angle 0^\circ\text{ mA}$$

$$I_{RL2} = \frac{120\angle 120^\circ\text{ V}}{180\angle 0^\circ\ \Omega} = 667\angle 120^\circ\text{ mA}$$

$$I_{RL3} = \frac{120\angle -120^\circ\text{ V}}{180\angle 0^\circ\ \Omega} = 667\angle -120^\circ\text{ mA}$$

总负载功率为：

$$P_{L(tot)} = I_{RL1}^2 R_{L1} + I_{RL2}^2 R_{L2} + I_{RL3}^2 R_{L3} = 240\ \text{W}$$

该系统所传输的总负载功率与前面所讨论的单相和双相系统相同。

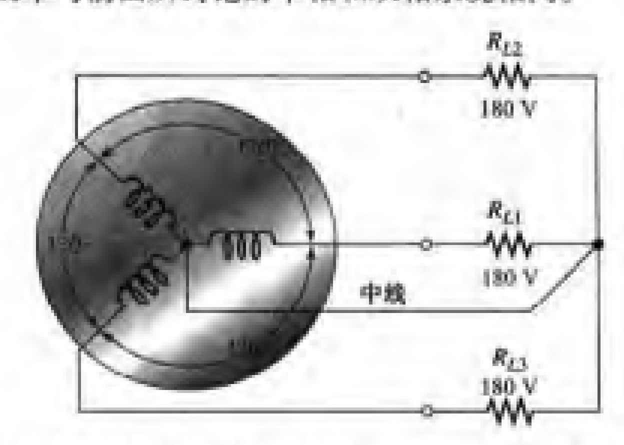


图 22.9 一台三相发电机且每一相与一个 180 Ω 负载相连

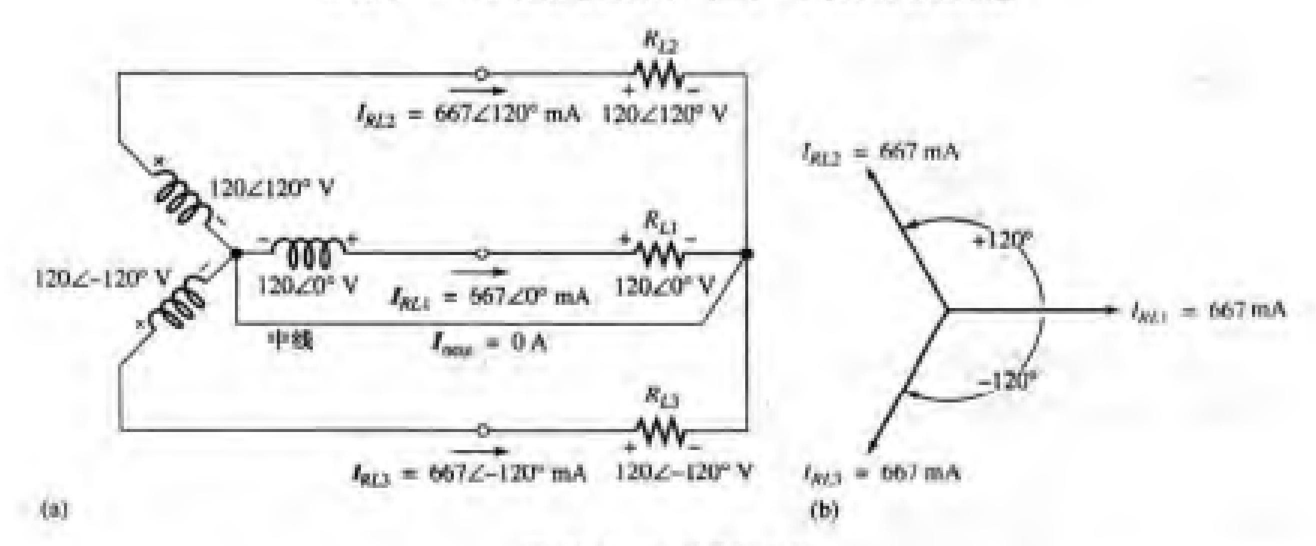


图 22.10 三相系统示例

由图中可以看到，若包括中线，则在本系统中共使用了四根电线为流入/流出负载的电流提供流通路径。其中三根电线上所流过的电流均为 667 mA，如图 22.10(a)所示。通过中线的电流相当于三个负载电流的相量和，即为 0，其相量图参见图 22.10(b)，计算公式如下：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I}_{RL1} + \boldsymbol{I}_{RL2} + \boldsymbol{I}_{RL3} &= 667\angle 0^\circ\ \text{mA} + 667\angle 120^\circ\ \text{mA} + 667\angle -120^\circ\ \text{mA} \\ &= 667\ \text{mA} - 333.5\ \text{mA} + j578\ \text{mA} - 333.5\ \text{mA} - j578\ \text{mA} \\ &= 667\ \text{mA} - 667\ \text{mA} = 0\ \text{A} \end{aligned}$$

这种所有负载电流相等且中线电流为 0 的情况称为平衡负载条件。

所有铜线总截面所通过的电流为 667 mA + 667 mA + 667 mA + 0 mA = 2 A，这个结果显示在传输相同负载功率的条件下，三相系统所需铜线总截面要小于单相和双相系统。铜线的使用量在配电系统中是一个很重要的考虑因素。

例 22.1 在电流运载能力方面，试比较 120 V 的单相和三相系统在有效负载为 12 Ω 时各铜线总截面的大小。

解：单相系统 负载电流为：

$$I_{RL} = \frac{120\ \text{V}}{12\ \Omega} = 10\ \text{A}$$

连接负载的电线上的电流为 10 A，由负载返回的电线上的电流也为 10 A。

因此，铜线总截面所运载电流的总量为 2 × 10 A = 20 A。

三相系统　由于等效负载为 12 Ω，所以三相发电机每一相所对应的负载电阻为 36 Ω，各负载电阻上的电流为：

$$I_{RL}=\frac{120\ \text{V}}{36\ \Omega}=3.33\ \text{A}$$

连接平衡负载的三根电线中的电流都应为 3.33 A，中线电流为 0。

因此，铜线总截面所运载的电流总量为 3 × 3.33 A = 10 A。对于同样的等效负载来说，三相系统中所需的铜线总截面所运载的电流总量要远小于单相系统。

练习：在电流运载能力方面，试比较 240 V 的单相和三相系统在有效负载为 100 Ω 时各铜线总截面的大小。

22.2.2　恒定功率的优点

多相系统相对于单相系统的第二个优点是多相系统中的负载功率恒定。

单相系统　如图 22.11 所示，负载功率等于正弦电压的平方除以电阻。负载功率从最大值 $V^2_{RL(max)}/R_L$ 到最小值 0 的变化频率是电压频率的两倍。

多相系统　如图 22.12 所示，在一个二相系统中，分别通过两个负载电阻的功率波形，彼此的相位差为 90°。一个负载的瞬时功率达到最大值时，另一个则变为最小值。在最大值和最小值之间，一个功率呈递增状态的同时，另一个则呈递减状态。仔细分析功率波形可以看出，两个瞬时值相加时总和是恒定不变的，且等于 $V^2_{RL(max)}/R_L$。

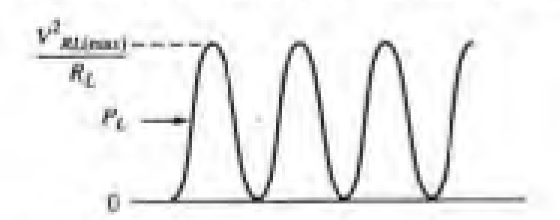


图 22.11　单相系统负载功率（$\sin^2$ 曲线）

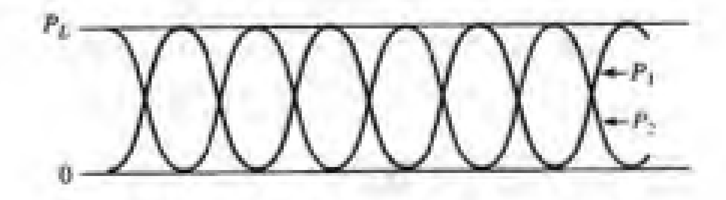


图 22.12　二相系统功率（$P_L = V^2_{RL(max)}/R_L$）

在三相系统中，传送给负载电阻的总功率也保持不变，其原因与二相系统相同。三相的瞬时电压之和也相同，因此功率是一个恒定值。一个恒定负载功率意味着机械能向电能的均衡转换，这也是很多电力应用中所要考虑的重要问题。

22.2.3　固定旋转磁场的优点

在很多应用场合，交流发电机常用于驱动交流电动机以转动轴的形式将电能转换为机械能。驱动发电机的初始能量来源有几种，如水力发电或蒸汽发电。图 22.13 说明了这个基本概念。

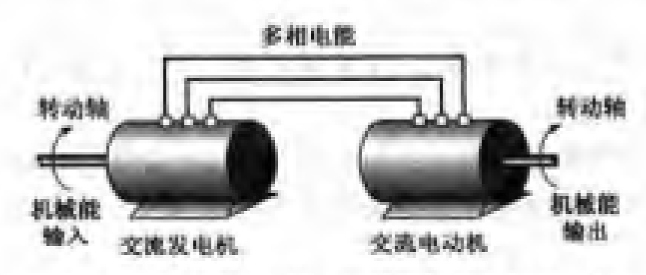


图 22.13　机械能 - 电能 - 机械能转换的简单示例

以图 22.14 中的一个双相系统来说明,当多相发电机与电动机的绕组相连时,在电动机内部产生一个具有固定磁通密度的磁场,且以双相正弦波的频率旋转。通过旋转磁场的作用,电动机的转子以固定速率旋转,从而产生持续的轴转动。

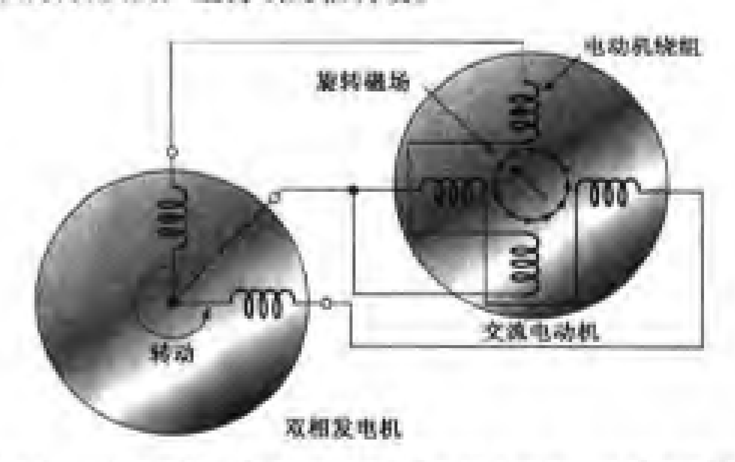


图 22.14 一台双相发电机在一台交流电动机内产生一个固定旋转的磁场

与双相系统一样,一个三相系统也具有同样的优点。单相系统在很多应用场合不适用,这是因为其产生磁场的磁通密度是变化的,且每一个周期内都会产生正反方向的变化,无法提供一个持续旋转的磁场。

22.2 节练习

1. 列出三个多相系统相较于单相系统的优点。
2. 哪一个优点在机械能转换为电能方面最重要?
3. 哪一个优点在电能转换为机械能方面最重要?

22.3 三相发电机

在前面几节中,发电机都是以 Y 型连接表示的。在本节中,将进一步分析 Y 型连接,并介绍另 种连接类型,即 Δ 型连接。

学习完本节之后,读者应该能够:

- 分析三相发电机的构造
- 分析 Y 型连接的发电机
- 分析 Δ 型连接的发电机

22.3.1 Y 型连接的发电机

一个 Y 型连接系统可以是三线的,如果使用中线,也可以是四线的,如图 22.15 所示,与一个通用负载相连,图中以灰色方框表示。回顾 下,负载处于平衡状态时,中线电流为 0,故此时中线可以省略。然而,一旦负载间并不相等(不平衡),则一根为电流提供回流路径的中线就是必需的,因为这时中线电流不为 0。

通常称加在发电机绕组两端的电压为相电压($\boldsymbol{V}_\theta$),通过绕组的电流为相电流($\boldsymbol{I}_\theta$),连接发电机绕组与负载间的边线上的电流称为线电流($\boldsymbol{I}_L$),边线到边线间的电压称为线电压($\boldsymbol{V}_L$)。注意对于 Y 型连接方式,线电流等于其对应的相电流。

$$I_L = I_\theta \tag{22.1}$$

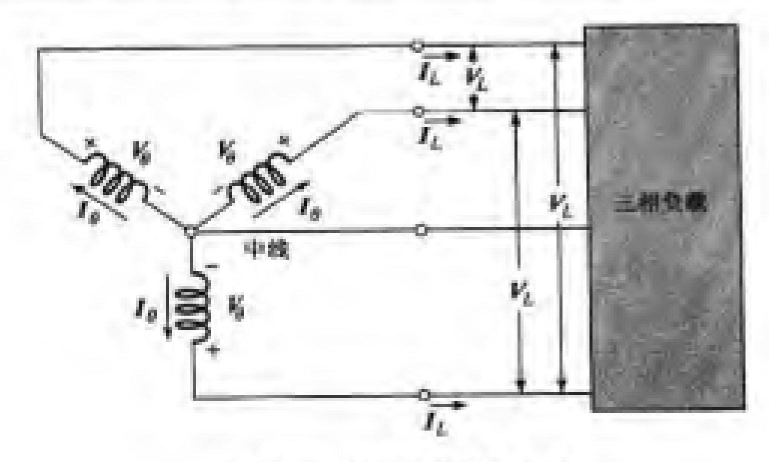


图 22.15　Y 型连接的发电机

图 22.16 中，将绕组的终端标记为 a、b 和 c，中线的端点标记为 n。通常用这些字母作为下标来标记所对应的相电流和线电流，相电压的标记也是遵照这一方法。由图中可以看出相电压在绕组的终端总是为正，而在中线点处总是为负。线电压是指任意两个绕组端点间的电压，是用双下标表示的，例如 $\mathbf{V}_{L(ba)}$ 表示的是 b 端到 a 端的线电压。

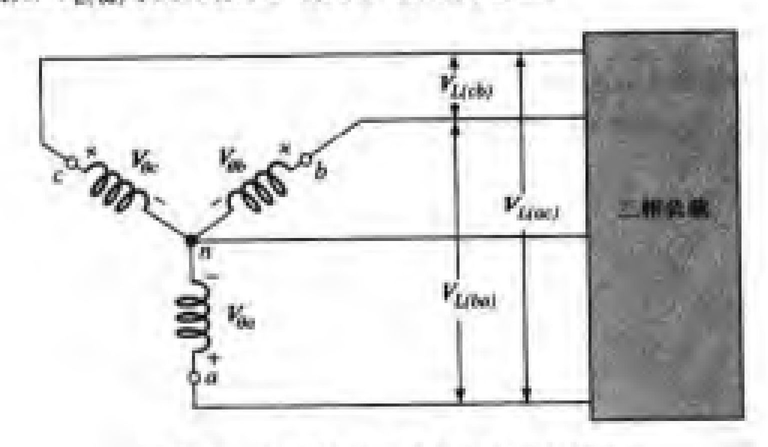


图 22.16　Y 型连接系统的相电压和线电压

图 22.17(a)所示为相电压的相量图，将其旋转，得到图 22.17(b)，若以 $V_{\theta a}$ 作为参考，令其相角为 0°，则三个相电压的极坐标表示如下：

$$\mathbf{V}_{\theta a} = V_{\theta a}\angle 0^\circ$$
$$\mathbf{V}_{\theta b} = V_{\theta b}\angle 120^\circ$$
$$\mathbf{V}_{\theta c} = V_{\theta c}\angle -120^\circ$$

现在有三个线电压：一个是 a，b 之间，一个是 a，c 之间，还有一个是 b，c 之间。由图中可以看出每个线电压的大小是相电压的$\sqrt{3}$倍，且线电压与离其最近的相电压间的相角为 30°。

$$V_L = \sqrt{3}V_\theta \tag{22.2}$$

因为所有相电压的大小相等，故各线电压为：

$$\mathbf{V}_{L(ba)} = \sqrt{3}V_\theta\angle 150^\circ$$
$$\mathbf{V}_{L(ac)} = \sqrt{3}V_\theta\angle 30^\circ$$
$$\mathbf{V}_{L(cb)} = \sqrt{3}V_\theta\angle -90^\circ$$

在图 22.18 所示的线电压相量图中添加相电压的相量图，可以看出线电压与离其最近的相电压间的相角为 30°，而线电压彼此间的相角为 120°。

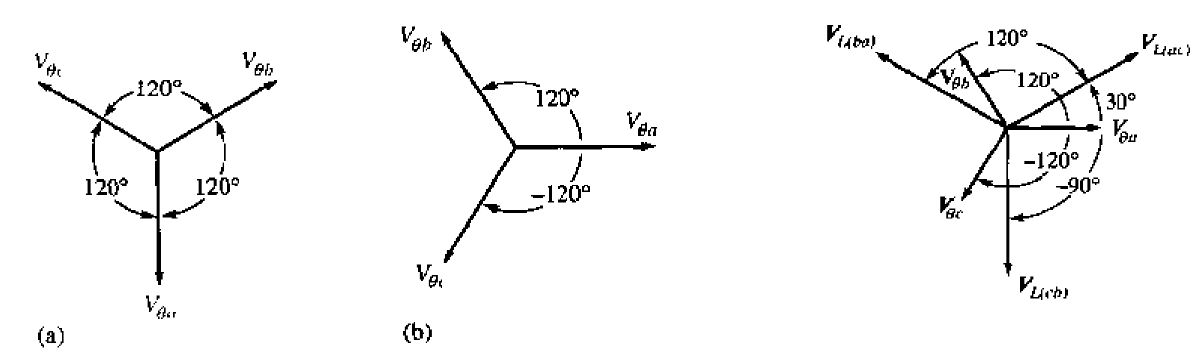


图 22.17 相电压的相量图

图 22.18 三相系统中，Y 形连接的相电压和线电压的相量图

例 22.2 图 22.19 所示为某 Y 型连接交流发电机的一个瞬间位置。如果每个相电压的大小为 120 V rms，试确定每个线电压的大小，并画出相量图。

解：每个线电压的大小为：

$$V_L = \sqrt{3}V_\theta = \sqrt{3}(120\ \text{V}) = \mathbf{208\ V}$$

发电机在该瞬间的相量图如图 22.20 所示。

练习：如果将图 22.19 中的发电机位置顺时针旋转 45°，试确定其线电压的大小。

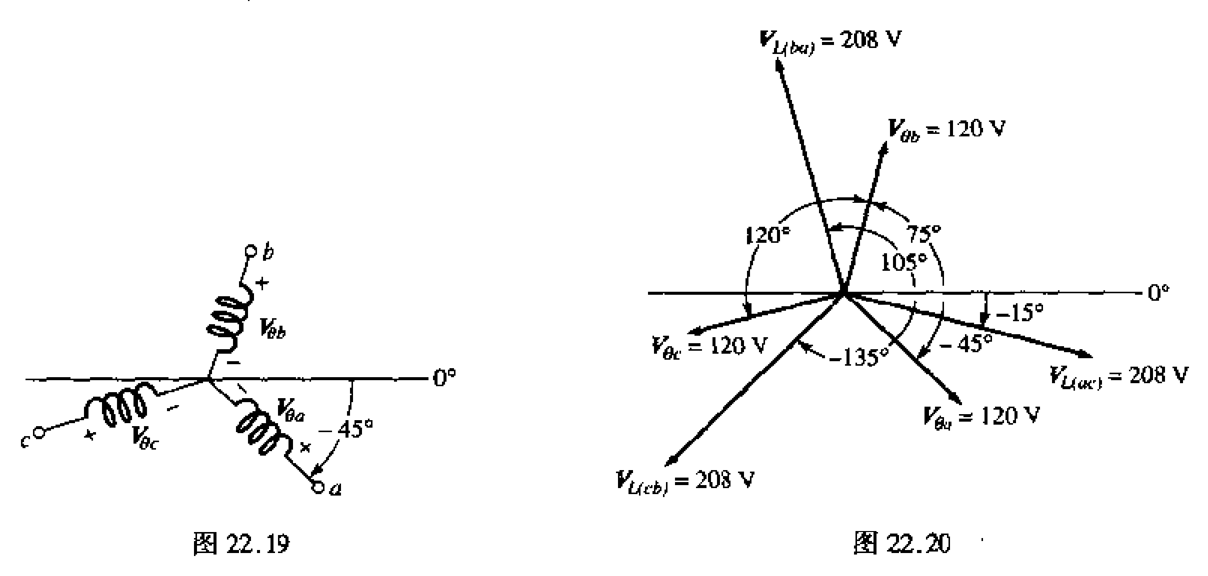


图 22.19

图 22.20

22.3.2 Δ 型连接的发电机

在 Y 型连接的发电机中，一个四线系统有两种电压值，即相电压和线电压。此外，在 Y 型连接的发电机中，其线电流就等于相电流。记住这些特性，对于分析 Δ 型连接的发电机会有帮助。

如图 22.21 所示，三相发电机的绕组可以重新排列成 Δ 型连接。通过分析该图可以看出，线电压的大小等于其相电压的大小，但线电流却不等于其相电流。

因为这是一个三线系统，故只有一个电压值，表示为：

$$V_L = V_\theta \tag{22.3}$$

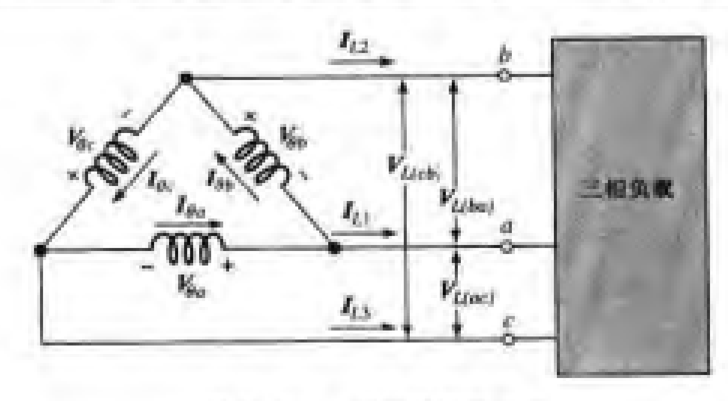


图 22.21 Δ 型连接的发电机

所有相电压的大小都相等，因此线电压的极坐标表示如下：

$$V_{L(ac)} = V_{\theta}\angle 0^{\circ}$$
$$V_{L(ba)} = V_{\theta}\angle 120^{\circ}$$
$$V_{L(cb)} = V_{\theta}\angle -120^{\circ}$$

图 22.22 所示为相电流的相量图，相电流的极坐标表示如下：

$$I_{\theta a} = I_{\theta a}\angle 0^{\circ}$$
$$I_{\theta b} = I_{\theta b}\angle 120^{\circ}$$
$$I_{\theta c} = I_{\theta c}\angle -120^{\circ}$$

由图中可以看出线电流的大小是相电流的$\sqrt{3}$倍，且线电流与离其最近的相电流间的相角为 30°。

$$I_L = \sqrt{3}I_{\theta} \tag{22.4}$$

因为所有相电流的大小相等，故各线电流为：

$$I_{L1} = \sqrt{3}I_{\theta}\angle -30^{\circ}$$
$$I_{L2} = \sqrt{3}I_{\theta}\angle 90^{\circ}$$
$$I_{L3} = \sqrt{3}I_{\theta}\angle -150^{\circ}$$

图 22.23 所示为相电流和线电流的相量图。

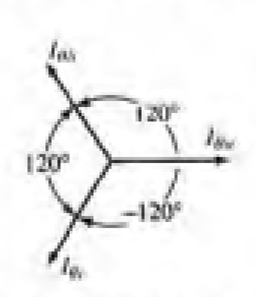


图 22.22 Δ 型连接系统中相电流的相量图

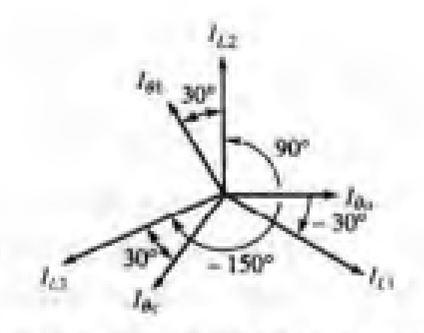


图 22.23 相电流和线电流的相量图

例 22.3 图 22.24 中所示的是一个 Δ 型连接的三相发电机驱动一个平衡负载，每一个相电流的大小都为 10 A。当 $I_{\theta a} = 10\angle 30^{\circ}$ A 时，尝试：

(a) 用极坐标表示其他相电流 (b) 用极坐标表示每一个线电流 (c) 画出电流的相量图

解：(a) 相电流彼此间隔 120°，因此，

$$I_{\theta b} = 10\angle(30^{\circ} + 120^{\circ}) = \mathbf{10\angle 150^{\circ}\ A}$$
$$I_{\theta c} = 10\angle(30^{\circ} - 120^{\circ}) = \mathbf{10\angle -90^{\circ}\ A}$$

(b) 线电流与离其最近的相电流间的相角为 30°,因此,

$$\mathbf{I}_{L1} = \sqrt{3}I_{\theta a}\angle(30° - 30°) = \mathbf{17.3\angle 0°\ A}$$
$$\mathbf{I}_{L2} = \sqrt{3}I_{\theta b}\angle(150° - 30°) = \mathbf{17.3\angle 120°\ A}$$
$$\mathbf{I}_{L3} = \sqrt{3}I_{\theta c}\angle(-90° - 30°) = \mathbf{17.3\angle -120°\ A}$$

(c) 相量图如图 22.25 所示。

练习:上面的例子中如果更改为 $\mathbf{I}_{\theta a} = 8\angle 60°$ A,重新完成(a)和(b)。

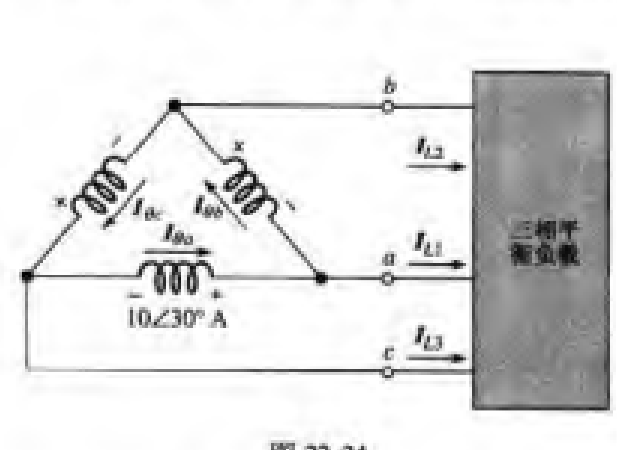


图 22.24

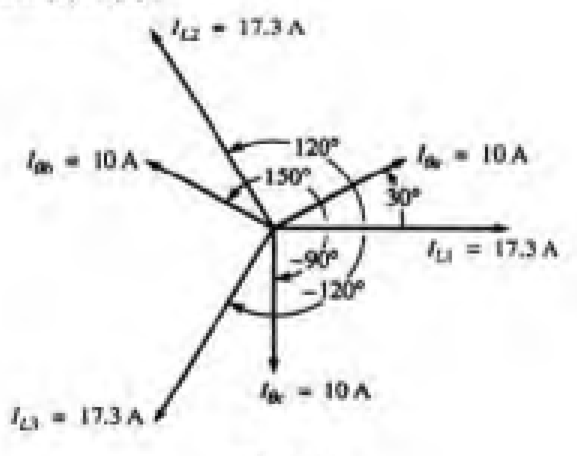


图 22.25

22.3 节练习

1. 某三线 Y 型连接的发电机,其相电压为 1 kV,试确定线电压的大小。
2. 问题 1 中的 Y 型连接的发电机,其所有相电流都为 5 A,求其线电流的大小。
3. 一台 Δ 型连接的发电机,相电压为 240 V,其线电压为多少?
4. 一台 Δ 型连接的发电机,相电流为 2 A,确定其线电流的大小。

22.4 三相电源/负载分析

在本节中,我们主要讨论的是电源/负载的四种结构。在与发电机相连时,负载也可以有 Y 型和 Δ 型两种接法。

学习完本节之后,读者应该能够:

- 分析三相负载与三相发电机所组成的电路
- 分析 Y - Y 型接法的电源/负载结构
- 分析 Y - Δ 型接法的电源/负载结构
- 分析 Δ - Y 型接法的电源/负载结构
- 分析 Δ - Δ 型接法的电源/负载结构

图 22.26(a)所示为负载的 Y 型接法,图 22.26(b)所示为负载的 Δ 型接法。方框 $\mathbf{Z}_a$,$\mathbf{Z}_b$ 和 $\mathbf{Z}_c$ 表示负载的阻抗,可能是阻抗、电抗或两者都包括在内。

在本节中,将分析四种电源/负载结构:Y 型连接的电源驱动 Y 型连接的负载(Y - Y 系统);Y 型连接的电源驱动 Δ 型连接的负载(Y - Δ 系统);Δ 型连接的电源驱动 Y 型连接的负载(Δ - Y 系统);Δ 型连接的电源驱动 Δ 型连接的负载(Δ - Δ 系统)。

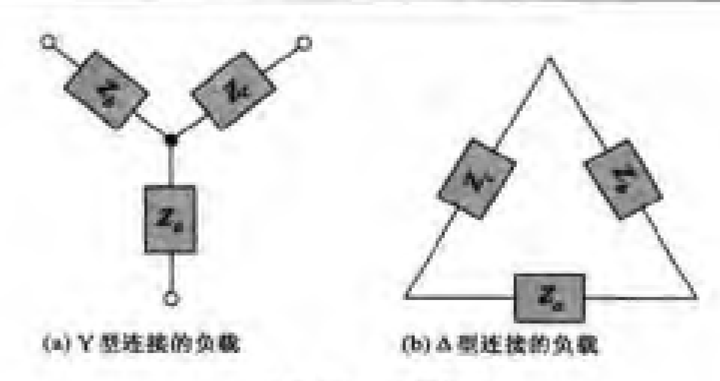


图 22.26 三相负载

22.4.1 Y-Y系统

图22.27所示为一个Y型连接的负载与一个Y型连接的电源组成的三相电路。图中电源所驱动的可能是一个平衡负载，例如一台 $\mathbf{Z}_a=\mathbf{Z}_b=\mathbf{Z}_c$ 的三相电动机；也可能是三个独立的单相负载，例如 $\mathbf{Z}_a$ 是一个照明电路，$\mathbf{Z}_b$ 是一个加热器，而 $\mathbf{Z}_c$ 是一个空气调节压缩机。

Y型连接电源的一个重要特点是，三相电压的两种电压即相电压和线电压存在两个不同的数值。例如在配电系统中，可以认为一个三相变压器是一个提供120 V和208 V电压的三相电源。为了利用120 V的相电压，需要连接Y型结构的负载，而Δ型结构的负载用来利用208 V的线电压。

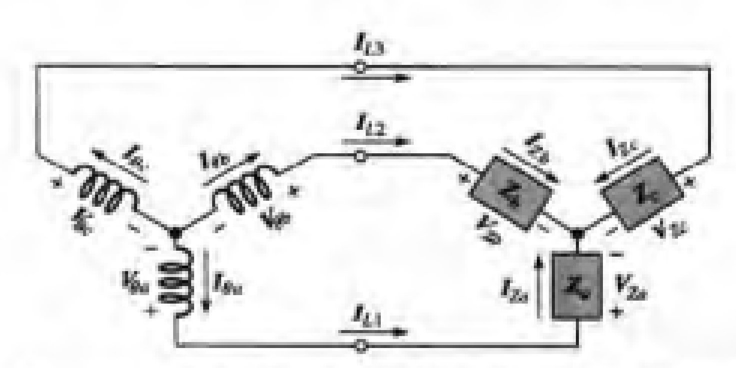


图 22.27 一个Y型连接的负载与一个Y型连接的电源组成的三相电路

从图22.27中可以看出，在Y-Y系统中，电源每一相的相电流、线电流和负载电流都相等。同时，每一个负载上的电压也等于其对应的相电压。这种关系对于平衡负载和非平衡负载都适用，具体表示如下：

$$I_\theta = I_L = I_Z \tag{22.5}$$

$$V_\theta = V_Z \tag{22.6}$$

其中，V_Z 和 I_Z 分别为负载电压和负载电流。

对于一个平衡负载来说，所有的相电流都相等，中线电流为0。而对于一个非平衡负载来说，每一个相电流都不相同，因此其中线电流不为0。

例22.4 图22.28所示的一个Y-Y系统中，求：

(a) 每个负载电流　　(b) 每个线电流　　(c) 每个相电流

(d) 中线电流　　(e) 每个负载电压

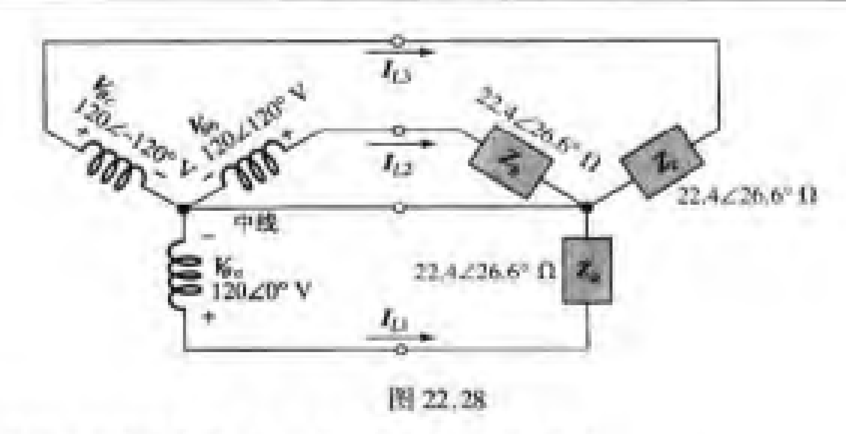


图 22.28

解:电源驱动的是一个平衡负载。$Z_a = Z_b = Z_c = 22.4\angle 26.6°\ \Omega$。

(a) 负载电流为:

$$I_{Za} = \frac{V_{\phi a}}{Z_a} = \frac{120\angle 0°\ \text{V}}{22.4\angle 26.6°\ \Omega} = \mathbf{5.36\angle -26.6°\ A}$$

$$I_{Zb} = \frac{V_{\phi b}}{Z_b} = \frac{120\angle 120°\ \text{V}}{22.4\angle 26.6°\ \Omega} = \mathbf{5.36\angle 93.4°\ A}$$

$$I_{Zc} = \frac{V_{\phi c}}{Z_c} = \frac{120\angle -120°\ \text{V}}{22.4\angle 26.6°\ \Omega} = \mathbf{5.36\angle -147°\ A}$$

(b) 线电流为:

$$I_{L1} = \mathbf{5.36\angle -26.6°\ A}$$
$$I_{L2} = \mathbf{5.36\angle 93.4°\ A}$$
$$I_{L3} = \mathbf{5.36\angle -147°\ A}$$

(c) 相电流为:

$$I_{\phi a} = \mathbf{5.36\angle -26.6°\ A}$$
$$I_{\phi b} = \mathbf{5.36\angle 93.4°\ A}$$
$$I_{\phi c} = \mathbf{5.36\angle -147°\ A}$$

(d)
$$\begin{aligned} I_{\text{neut}} &= I_{Za} + I_{Zb} + I_{Zc} \\ &= 5.36\angle -26.6°\ \text{A} + 5.36\angle 93.4°\ \text{A} + 5.36\angle -147°\ \text{A} \\ &= (4.80\ \text{A} - j2.40\ \text{A}) + (-0.33\ \text{A} + j5.35\ \text{A}) + (-4.47\ \text{A} - j2.95\ \text{A}) = \mathbf{0\ A} \end{aligned}$$

如果各负载阻抗不等(非平衡负载),则中线电流将不为 0。

(e) 负载电压等于其相应的电源相电压。

$$V_{Za} = \mathbf{120\angle 0°\ V}$$
$$V_{Zb} = \mathbf{120\angle 120°\ V}$$
$$V_{Zc} = \mathbf{120\angle -120°\ V}$$

练习:图 22.28 中,假设 Z_a 和 Z_b 相等,$Z_c = 50\angle 26.6°\ \Omega$,求中线电流。

22.4.2 Y-Δ 系统

图 22.29 所示为一个 Δ 型连接的负载与一个 Y 型连接的电源组成的三相电路。这种结构的特点是电源的三条线电压分别加在三个负载上,即负载电压就是该负载所对应的线电压。

$$V_Z = V_L \tag{22.7}$$

如图所示,线电流等于其相应的相电流,且每一个线电流都分成两股负载电流。对于平衡负载($Z_a = Z_b = Z_c$)来说,每个负载电流的表达式为:

$$I_L = \sqrt{3} I_Z \tag{22.8}$$

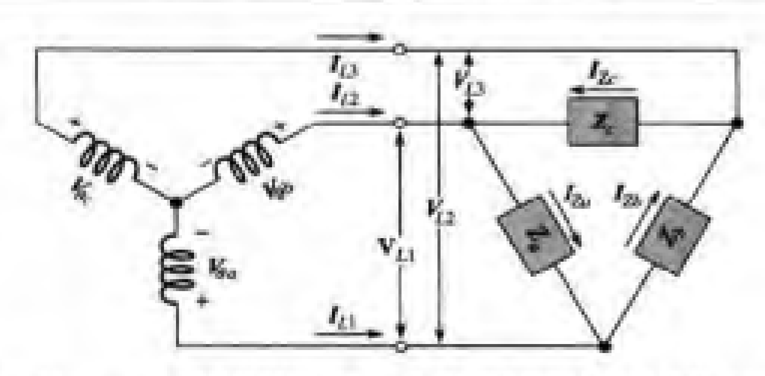


图 22.29 一个 Δ 型连接的负载与一个 Y 型连接的电源组成的三相电路

例 22.5 确定图 22.30 中的负载电压和负载电流,并用相量图表示它们的关系。

解:负载电压为:

$$V_{Za} = V_{L1} = 2\sqrt{3}\angle 150^\circ \text{ kV} = \mathbf{3.46\angle 150^\circ\ kV}$$
$$V_{Zb} = V_{L2} = 2\sqrt{3}\angle 30^\circ \text{ kV} = \mathbf{3.46\angle 30^\circ\ kV}$$
$$V_{Zc} = V_{L3} = 2\sqrt{3}\angle -90^\circ \text{ kV} = \mathbf{3.46\angle -90^\circ\ kV}$$

负载电流为:

$$I_{Za} = \frac{V_{Za}}{Z_a} = \frac{3.46\angle 150^\circ \text{ kV}}{100\angle 30^\circ\ \Omega} = \mathbf{34.6\angle 120^\circ\ A}$$

$$I_{Zb} = \frac{V_{Zb}}{Z_b} = \frac{3.46\angle 30^\circ \text{ kV}}{100\angle 30^\circ\ \Omega} = \mathbf{34.6\angle 0^\circ\ A}$$

$$I_{Zc} = \frac{V_{Zc}}{Z_c} = \frac{3.46\angle -90^\circ \text{ kV}}{100\angle 30^\circ\ \Omega} = \mathbf{34.6\angle -120^\circ\ A}$$

相量图如图 22.31 所示。

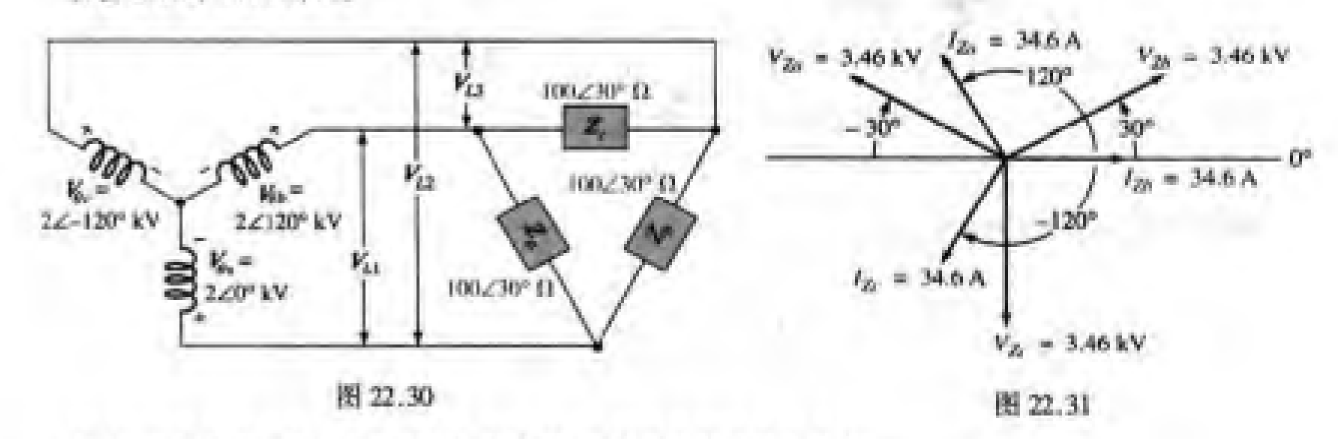


图 22.30　　图 22.31

练习:如果相电压的大小为 240 V,则图 22.30 中的负载电流是多少?

22.4.3 Δ－Y 系统

图 22.32 所示为一个 Y 型连接的负载与一个 Δ 型连接的电源组成的三相电路。从图中可以看出,电源的线电压等于其对应的相电压,每个相电压也等于其对应的两个负载电压之差。

每一个负载电流都等于其对应的线电流。由于是平衡负载,负载电流之和为 0,故中线是可以省略的。

负载电压与其对应的线电压(相电压)间的关系如下:

$$V_\theta = \sqrt{3}V_Z \tag{22.9}$$

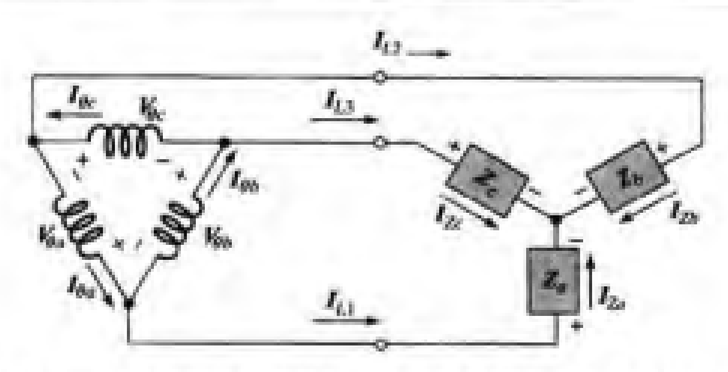


图 22.32 一个 Y 型连接的负载与一个 Δ 型连接的电源组成的三相电路

线电流等于其对应的负载电流，对于一个平衡负载来说，负载电流之和为 0。

$$\mathbf{I}_L = \mathbf{I}_Z \tag{22.10}$$

从图 22.32 中可以看出，每个线电流等于两个相电流之差。

$$\mathbf{I}_{L1} = \mathbf{I}_{\theta a} - \mathbf{I}_{\theta b}$$
$$\mathbf{I}_{L2} = \mathbf{I}_{\theta c} - \mathbf{I}_{\theta a}$$
$$\mathbf{I}_{L3} = \mathbf{I}_{\theta b} - \mathbf{I}_{\theta c}$$

例 22.6 根据图 22.33，确定平衡负载的电流和电压以及线电压的大小。

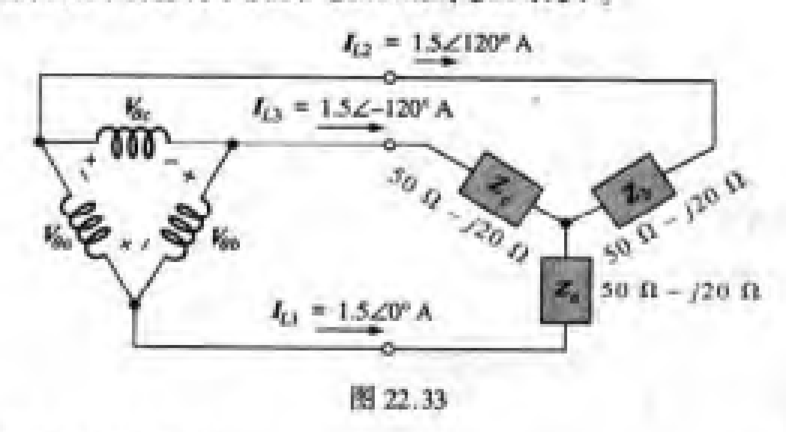


图 22.33

解：负载电流等于其对应的线电流。

$$\mathbf{I}_{Za} = \mathbf{I}_{L1} = \mathbf{1.5\angle 0^\circ\ A}$$
$$\mathbf{I}_{Zb} = \mathbf{I}_{L2} = \mathbf{1.5\angle 120^\circ\ A}$$
$$\mathbf{I}_{Zc} = \mathbf{I}_{L3} = \mathbf{1.5\angle -120^\circ\ A}$$

负载电压为：

$$\begin{aligned}\mathbf{V}_{Za} &= \mathbf{I}_{Za}\mathbf{Z}_a\\ &= (1.5\angle 0^\circ\ \text{A})(50\ \Omega - j20\ \Omega)\\ &= (1.5\angle 0^\circ\ \text{A})(53.9\angle -21.8^\circ\ \Omega) = \mathbf{80.9\angle -21.8^\circ\ V}\\ \mathbf{V}_{Zb} &= \mathbf{I}_{Zb}\mathbf{Z}_b\\ &= (1.5\angle 120^\circ\ \text{A})(53.9\angle -21.8^\circ\ \Omega) = \mathbf{80.9\angle 98.2^\circ\ V}\\ \mathbf{V}_{Zc} &= \mathbf{I}_{Zc}\mathbf{Z}_c\\ &= (1.5\angle -120^\circ\ \text{A})(53.9\angle -21.8^\circ\ \Omega) = \mathbf{80.9\angle -142^\circ\ V}\end{aligned}$$

线电压的大小为：

$$V_L = V_\theta = \sqrt{3}V_Z = \sqrt{3}(80.9\ \text{V}) = \mathbf{140\ V}$$

练习：如果线电流的大小为 1 A，则负载电流为多少？

22.4.4 Δ-Δ 系统

图 22.34 所示为一个 Δ 型连接的负载与一个 Δ 型连接的电源组成的三相电路。由图中可知，对于任一相来说，电源的相电压、线电压和负载电压全都相等。

$$V_{\theta a} = V_{L1} = V_{Za}$$
$$V_{\theta b} = V_{L2} = V_{Zb}$$
$$V_{\theta c} = V_{L3} = V_{Zc}$$

当然，如果是平衡负载，则上述所有电压都相等，通用表达式如下：

$$V_\theta = V_L = V_Z \tag{22.11}$$

由于平衡负载各阻抗相等，且电源相电压也相等，则：

$$I_L = \sqrt{3}I_Z \tag{22.12}$$

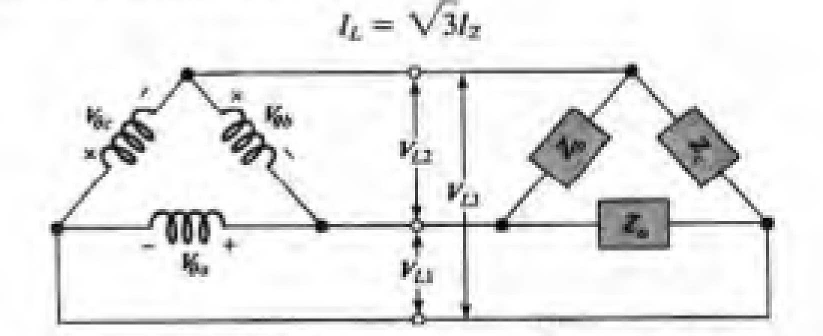


图 22.34 一个 Δ 型连接的负载与一个 Δ 型连接的电源组成的三相电路

例 22.7 确定图 22.35 中负载电流和线电流的大小。

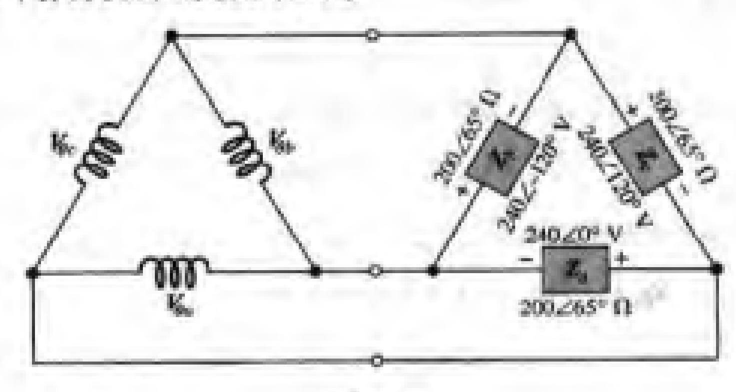


图 22.35

解：

$$V_{Za} = V_{Zb} = V_{Zc} = 240\ \text{V}$$

负载电流的大小为：

$$I_{Za} = I_{Zb} = I_{Zc} = \frac{V_{Za}}{Z_a} = \frac{240\ \text{V}}{200\ \Omega} = \mathbf{1.20\ A}$$

线电流的大小为：

$$I_L = \sqrt{3}I_Z = \sqrt{3}(1.20\ \text{A}) = \mathbf{2.08\ A}$$

练习：如果图 22.35 中负载电压的大小为 120 V，且阻抗为 600 Ω，求负载电流和线电流的大小。

22.4 节练习

1. 列出 4 种三相电源/负载的结构。

2. 在某 Y - Y 系统中,已知电源的相电流大小为 3.5 A,求平衡负载条件下的负载电流。
3. 在一个 Y - Δ 系统中,$V_L = 220$ V,求 V_Z。
4. 一个平衡的 Δ - Y 系统中,当电源相电压的大小为 60 V 时,试确定线电压的大小。
5. 一个平衡的 Δ - Δ 系统中,已知线电流的大小为 3.2 A,求负载电流的大小。

22.5 三相功率

本节将要讨论的是三相系统的功率及功率的测量方法。
学习完本节之后,读者应该能够:

- 论述三相功率的测量方法
- 描述三瓦特计法
- 描述双瓦特计法

对于一个平衡三相负载来说,其每一相的负载功率相等。因此,负载总功率即为任一相负载功率的三倍。

$$P_{L(tot)} = 3V_Z I_Z \cos\theta \tag{22.13}$$

其中,V_Z 和 I_Z 分别表示每一相负载的电压和电流,$\cos\theta$ 是功率因数。

回顾一下在平衡的 Y 型连接系统中,线电压和线电流为:

$$V_L = \sqrt{3}V_Z \quad 并且 \quad I_L = I_Z$$

而在平衡的 Δ 型连接系统中,线电压和线电流为:

$$V_L = V_Z \quad 并且 \quad I_L = \sqrt{3}I_Z$$

将上述关系分别代入式(22.13),则 Y 型和 Δ 型连接系统的负载总功率皆为:

$$P_{L(tot)} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta \tag{22.14}$$

例 22.8 在某 Δ 型连接的平衡负载中,线电压为 250 V,且阻抗为 $50\angle 30^\circ\ \Omega$,求负载总功率。

解:在 Δ 型系统中,$V_Z = V_L$,$I_L = \sqrt{3}I_Z$,负载电流大小为:

$$I_Z = \frac{V_Z}{Z} = \frac{250\text{ V}}{50\ \Omega} = 5\text{ A}$$

且,

$$I_L = \sqrt{3}I_Z = \sqrt{3}(5\text{ A}) = 8.66\text{ A}$$

功率因数为:

$$\cos\theta = \cos 30^\circ = 0.866$$

负载总功率为:

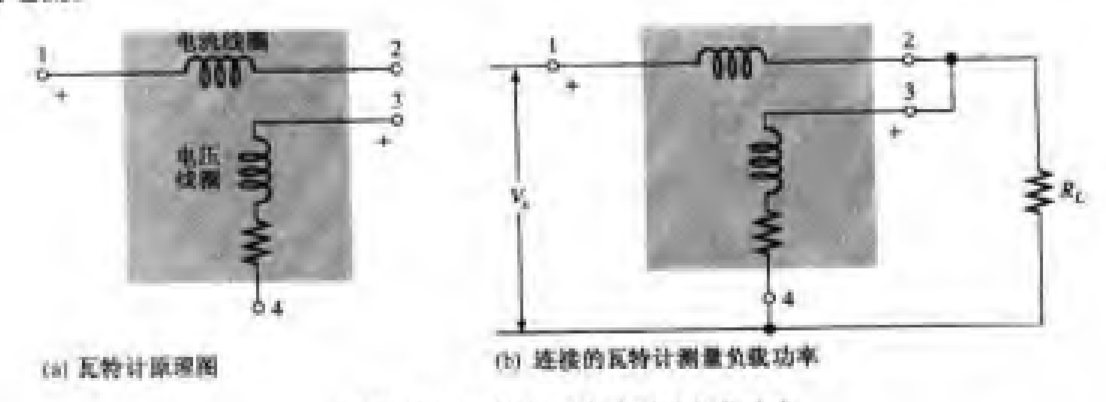
$$P_{L(tot)} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta = \sqrt{3}(250\text{ V})(8.66\text{ A})(0.866) = \mathbf{3.25\ kW}$$

练习:如果 $V_L = 120$ V,$\mathbf{Z} = 100\angle 30^\circ\ \Omega$,试求负载总功率。

22.5.1 功率测量

三相系统中的功率是用瓦特计来测量的。瓦特计是由两个线圈组成的电测式机械装置,其中一个线圈用来测量电流,另一个测量电压。指针偏转与通过负载的电流和加在负载两端的电

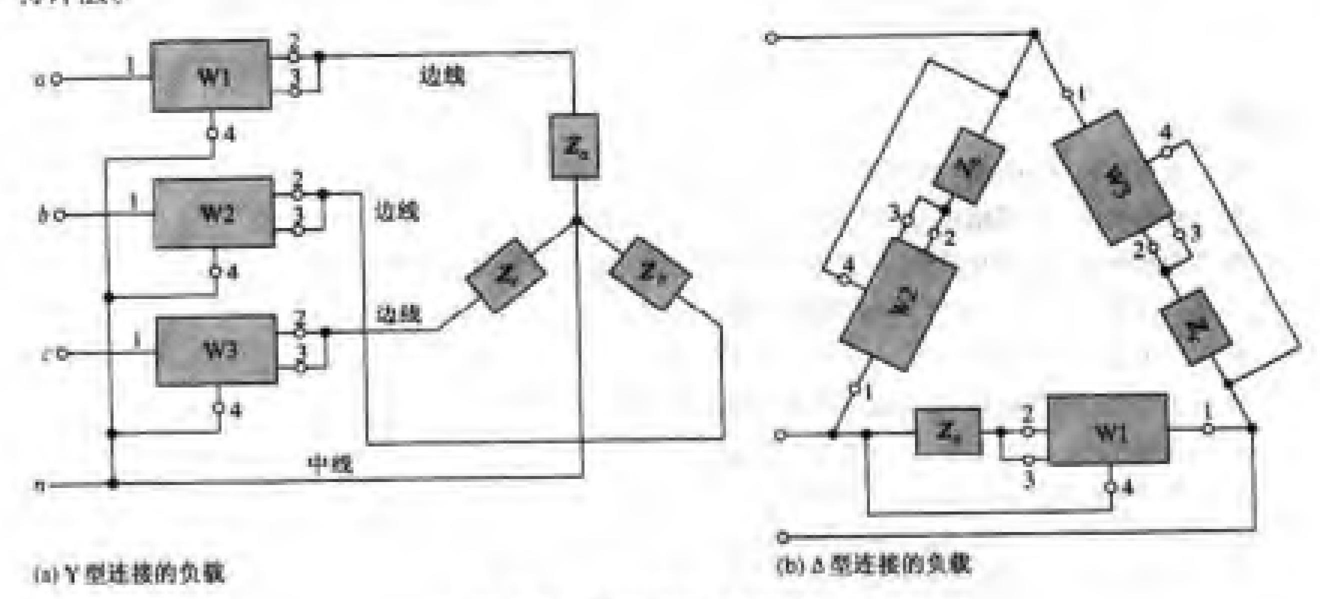
压成正比，从而标示功率。图22.36所示为一个基本的瓦特计符号以及接入负载后的原理图。图中与电压线圈串联的电阻是一个限流电阻，作用是限制流过线圈的电流，使其远远小于通过负载的电流。



(a) 瓦特计原理图　(b) 连接的瓦特计测量负载功率

图22.36 连接的瓦特计测量负载功率

三瓦特计法 从图22.37中可以看出，无论是Y型连接还是Δ型连接，是三相平衡负载还是非平衡的三相负载，使用三个瓦特计都可以很容易地测出其负载功率。这种方法通常称为三瓦特计法。



(a) Y型连接的负载　(b) Δ型连接的负载

图22.37 功率测量的三瓦特计法

三个瓦特计读数的和即为总功率。

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + P_3 \tag{22.15}$$

如果负载是平衡的，则总功率就是任一瓦特计读数的3倍。

在很多三相负载中，尤其是Δ型结构，瓦特计的连接中电压线圈与负载的并联以及电流线圈与负载的串联都是很难实现的，这是由于通常无法触及到负载内部。

双瓦特计法 另一种三相功率测量方法使用的是两个瓦特计，其接线方法如图22.38所示。从图中可以看出，每个瓦特计的电压线圈与一个线电压两端相连，电流线圈中则有线电流通过。可以证明：两个瓦特计读数的代数和等于Y型连接或Δ型连接的负载总功率。

$$P_{tot} = P_1 \pm P_2 \tag{22.16}$$

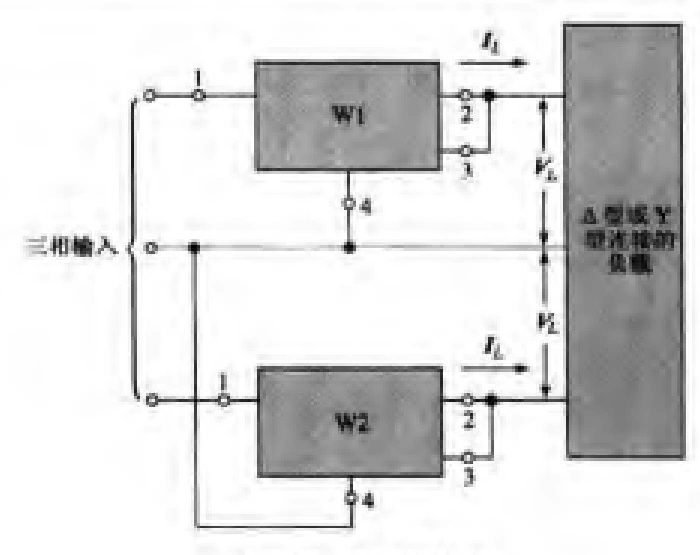


图 22.38 双瓦特计法

22.5 节练习

1. $V_L = 30$ V, $I_L = 1.2$ A,且功率因数为 0.257,则平衡 Y 型负载的总功率为多少? 换成平衡 Δ 型负载,其总功率又是多少?
2. 用三个瓦特计测量一个平衡负载的总功率为 2678 W,则每个瓦特计的读数为多少?

小结

- 一台简单的双相发电机由在磁场中旋转且间隔为 90°的两个导电棒组成。
- 一台简单的三相发电机由间隔 120°的三个导电棒组成。
- 多相系统相对于单相系统的三个优点是:在传输负载功率相同的条件下,铜线总截面最小、传输到负载的功率恒定,以及有一个固定旋转的磁场。
- 在 Y 型连接的发电机中,$I_L = I_\theta$, $V_L = \sqrt{3}V_\theta$。
- 在 Y 型连接的发电机中,线电压和离其最近的相电流间的相位差为 30°。
- 在 Δ 型连接的发电机中,$V_L = V_\theta$, $I_L = \sqrt{3}I_\theta$。
- 在 Δ 型连接的发电机中,线电流和离其最近的相电流间的相位差为 30°。
- 一个平衡负载中的各个单独负载阻抗都相等。
- 三相负载的功率测量既可以用三瓦特计法,也可以用双瓦特计法。

主要术语

交流发电机:一种将机械能转换为交流电能的设备。

平衡负载:各相负载电流相等且中线电流为 0 的情况。

励磁绕组:交流发电机中转子上的绕组。

线电流(I_L):连接负载的边线上的电流。

线电压(V_L):连接负载的边线间的电压。

相电流(I_θ):通过发电机绕组的电流。

相电压(V_θ):加在发电机绕组两端的电压。

多相:表示有两个或两个以上的正弦电压,且彼此的相角不同。

转子:发电机或电动机中的旋转组件。

定子:发电机或电动机的外部固定部分。

公式

Y 型连接的发电机

22.1 $I_L = I_\theta$

22.2 $V_L = \sqrt{3}V_\theta$

Δ 型连接的发电机

22.3 $V_L = V_\theta$

22.4 $I_L = \sqrt{3}I_\theta$

Y－Y 系统

22.5 $I_\theta = I_L = I_Z$

22.6 $V_\theta = V_Z$

Y－Δ 系统

22.7 $V_Z = V_L$

22.8 $I_L = \sqrt{3}I_Z$

Δ－Y 系统

22.9 $V_\theta = \sqrt{3}V_Z$

22.10 $I_L = I_Z$

Δ－Δ 系统

22.11 $V_\theta = V_L = V_Z$

22.12 $I_L = \sqrt{3}I_Z$

三相功率

22.13 $P_{L(tot)} = 3V_Z I_Z \cos\theta$

22.14 $P_{L(tot)} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$

三瓦特计法

22.15 $P_{tot} = P_1 + P_2 + P_3$

双瓦特计法

22.16 $P_{tot} = P_1 \pm P_2$

自测题

1. 在一个三相系统中，三个电压的相位差为：
   (a) 90° (b) 30° (c) 180° (d) 120°
2. 术语“鼠笼式”通常用于下列哪一类设备中？
   (a) 三相交流发电机 (b) 单相交流发电机
   (c) 三相交流电动机 (d) 直流电动机
3. 交流发电机是指：
   (a) 三相交流发电机 (b) 单相交流发电机
   (c) 三相交流电动机 (d) 直流发电机
4. 发电机的两个主要组成部分是：
   (a) 转于和定子 (b) 转子和稳定器
   (c) 调节器和滑动环 (d) 磁铁和电刷
5. 三相系统相对于单相系统的优点是：
   (a) 较小的铜线总截面 (b) 较慢的转子转速

(c) 恒定功率 (d) 产生过热的机会减少

(e) 答案(a)和(c) (f) 答案(b)和(c)

6. 某个 240 V 的 Y 型连接的发电机，其相电流为 12 A，对应的线电流为：
(a) 36 A (b) 4 A (c) 12 A (d) 6 A

7. 某个 Δ 型连接的发电机产生的相电压为 30 V，则线电压的大小为：
(a) 10 V (b) 30 V (c) 90 V (d) 以上都不对

8. 某个 Δ - Δ 系统产生的相电流为 5 A，则线电流为：
(a) 5 A (b) 15 A (c) 8.66 A (d) 2.87 A

9. 某个 Y - Y 系统产生的相电流为 15 A，则线电流和负载电流为：
(a) 26 A (b) 8.66 A (c) 5 A (d) 15 A

10. 如果 Δ - Y 系统中的电源相电压为 220 V，则负载电压的大小为：
(a) 220 V (b) 381 V (c) 127 V (d) 73.3 V

习题(标有 * 的习题难度较大，奇数序号的习题答案在本书末尾)

22.1节 基本多相设备

1. 交流发电机的输出电压最大值为 250 V。当相角为多大时，其瞬时值为 75 V?
2. 某台双极性单相发电机，当其转速为 3600 rpm 时，该发电机产生电压的频率是多少?

22.2节 多相发电机在电力系统中的应用

3. 某台单相发电机驱动一个由 200 Ω 电阻和电抗为 175 Ω 的电容所组成的负载，发电机产生的电压为 100 V。试确定负载电流的大小及其与发电机电压的相位关系。
4. 在一个双相系统中，已知连接发电机与负载的两条边线上的电流为 3.8 A，求中线上的电流。
5. 某个非平衡的三相四线系统中，电流分别为 $2\angle 20°$ A，$3\angle 140°$ A 和 $1.5\angle -100°$ A，试确定中线上电流的大小。

22.3节 三相发电机

6. 试确定图 22.39 中的线电压。
7. 试确定图 22.40 中的线电流。
8. 画出图 22.40 中全部电流的相量图。

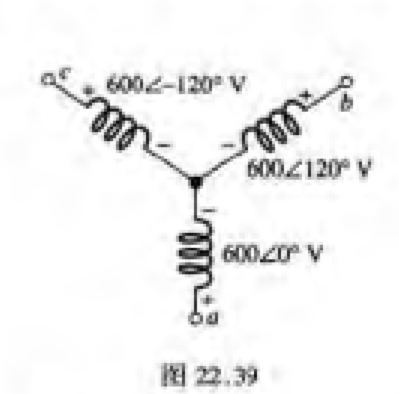


图 22.39

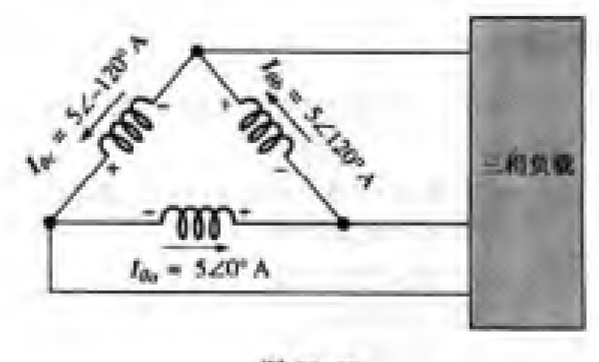


图 22.40

22.4节 三相电源/负载分析

9. 求图 22.41 所示 Y - Y 系统中下列变量的数值：
(a) 线电压 (b) 相电流 (c) 线电流 (d) 负载电流 (e) 负载电压

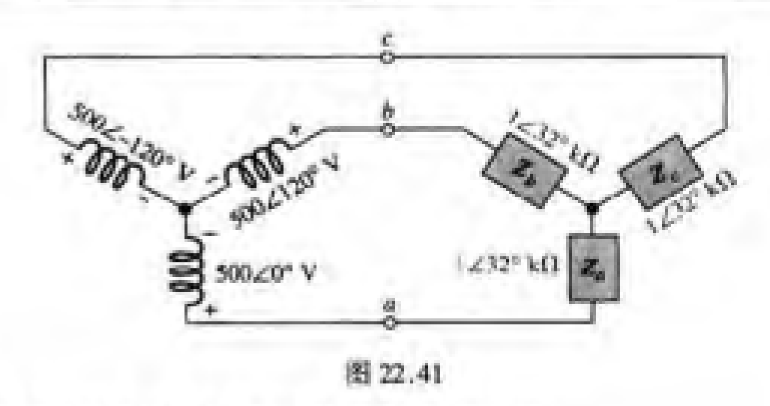


图 22.41

10. 根据图 22.42,重复完成习题 9 中的问题,并求出中线电流。

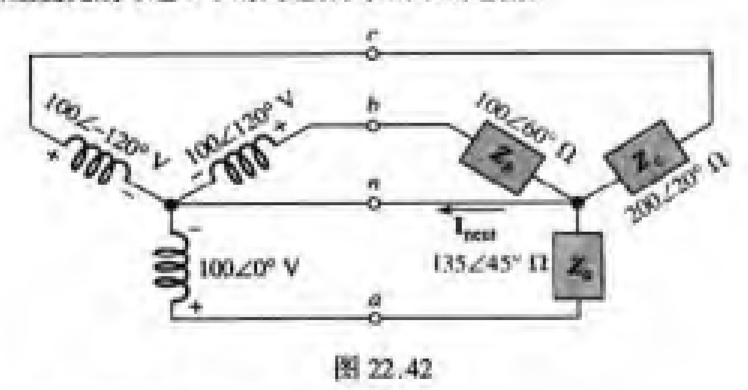


图 22.42

11. 根据图 22.43,重复完成习题 9 中的问题。

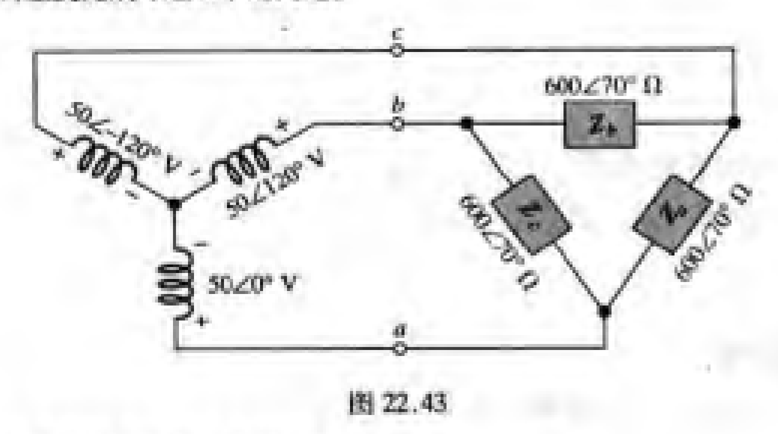


图 22.43

12. 根据图 22.44,重复完成习题 9 中的问题。

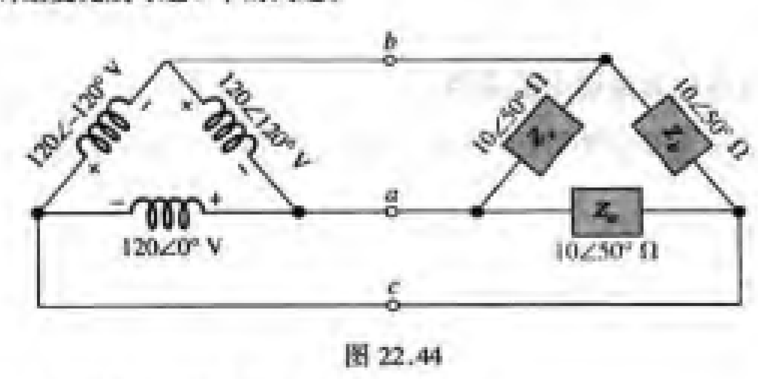


图 22.44

13. 试确定图 22.45 中的线电压和负载电流。

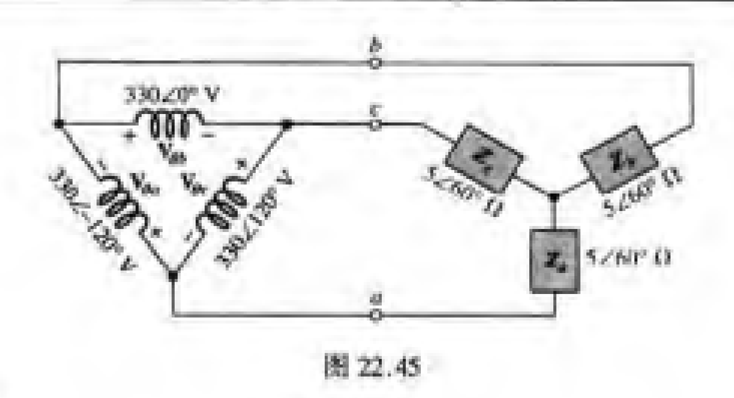


图 22.45

22.5 节 三相功率

14. 一个平衡三相系统每一相的负载功率为 1200 W,则负载总功率为多少?
15. 求图 22.41 到图 22.45 中的负载总功率。
16. 求图 22.46 中的负载总功率。

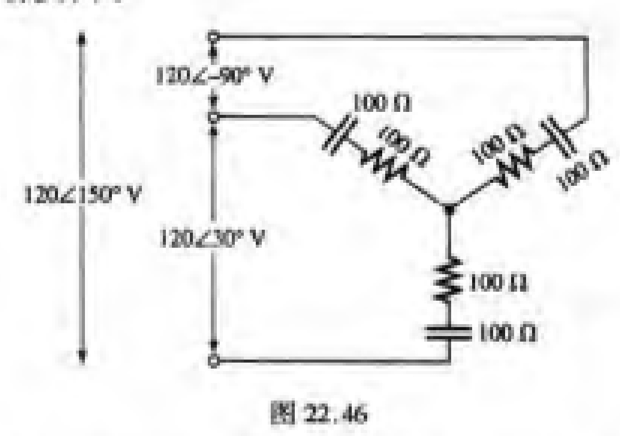


图 22.46

*17. 如果在图 22.46 的系统中使用三瓦特计法测量负载功率,则每一个瓦特计的示数应该为多少?
*18. 使用双瓦特计法重复完成习题 17 中的问题。

答案

22.1 节 基本多相设备

1. 在一台交流发电机中,一个导电棒在磁场中以固定速率旋转时会产生感应正弦电压。
2. $f = 400\ \text{Hz}$
3. 3 个电枢绕组

22.2 节 多相发电机在电力系统中的应用

1. 多相系统的优点是:传输电流所需的铜线总截面较小;恒定的负载功率;固定旋转的磁场。
2. 恒定功率
3. 固定旋转的磁场

22.3 节 三相发电机

1. $V_L = 1.73\ \text{kV}$
2. $I_L = 5\ \text{A}$
3. $V_L = 240\ \text{V}$
4. $I_L = 3.46\ \text{A}$

22.4 节　三相电源/负载分析

1. 三相电源/负载结构为：Y－Y，Y－Δ，Δ－Y 和 Δ－Δ。
2. $I_L = 3.5\ \text{A}$
3. $V_Z = 220\ \text{V}$
4. $V_L = 60\ \text{V}$
5. $I_Z = 1.85\ \text{A}$

22.5 节　三相功率

1. $P_Y = 16.0\ \text{W}; P_\Delta = 16.0\ \text{W}$
2. $P = 893\ \text{W}$

实例相关练习

22.1　单相为 4.8 A；三相为 2.4 A

22.2　208 V

22.3　(a) $\boldsymbol{I}_{\theta b} = 8\angle 180^\circ\ \text{A}, \boldsymbol{I}_{\theta c} = 8\angle -60^\circ\ \text{A}$

(b) $\boldsymbol{I}_{L1} = 13.9\angle 30^\circ\ \text{A}, \boldsymbol{I}_{L2} = 13.9\angle 150^\circ\ \text{A}, \boldsymbol{I}_{L3} = 13.9\angle -90^\circ\ \text{A}$

22.4　$2.96\angle 33.4^\circ\ \text{A}$

22.5　$\boldsymbol{I}_{Za} = 4.16\angle 120^\circ\ \text{A}, \boldsymbol{I}_{Zb} = 4.16\angle 0^\circ\ \text{A}, \boldsymbol{I}_{Zc} = 4.16\angle -120^\circ\ \text{A}$

22.6　$\boldsymbol{I}_{L1} = \boldsymbol{I}_{Za} = 1\angle 0^\circ\ \text{A}, \boldsymbol{I}_{L2} = \boldsymbol{I}_{Zb} = 1\angle 120^\circ\ \text{A}, \boldsymbol{I}_{L3} = \boldsymbol{I}_{Zc} = 1\angle -120^\circ\ \text{A}$

22.7　$I_Z = 200\ \text{mA}, I_L = 346\ \text{mA}$

22.8　374 W

自测题

1.(d)　2.(c)　3.(a)　4.(a)　5.(e)　6.(c)　7.(b)　8.(c)　9.(d)　10.(c)

附录 A　标准阻值列表

电阻允许偏差(±%)

0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%
10.0	10.0	10	10	14.7	14.7	—	—	21.5	21.5	—	—	31.6	31.6	—	—	46.4	46.4	—	—	68.1	68.1	68	68
10.1	—	—	—	14.9	—	—	—	21.8	—	—	—	32.0	—	—	—	47.0	—	47	47	69.0	—	—	—
10.2	10.2	—	—	15.0	15.0	15	15	22.1	22.1	22	22	32.4	32.4	—	—	47.5	47.5	—	—	69.8	69.8	—	—
10.4	—	—	—	15.2	—	—	—	22.3	—	—	—	32.8	—	—	—	48.1	—	—	—	70.6	—	—	
10.5	10.5	—	—	15.4	15.4	—	—	22.6	22.6	—	—	33.2	33.2	33	33	48.7	48.7	—	—	71.5	71.5	—	—
10.6	—	—	—	15.6	—	—	—	22.9	—	—	—	33.6	—	—	—	49.3	—	—	—	72.3	—	—	—
10.7	10.7	—	—	15.8	15.8	—	—	23.2	23.2	—	—	34.0	34.0	—	—	49.9	49.9	—	—	73.2	73.2	—	—
10.9	—	—	—	16.0	—	16	—	23.4	—	—	—	34.4	—	—	—	50.5	—	—	—	74.1	—	—	—
11.0	11.0	11		16.2	16.2	—	—	23.7	23.7	—	—	34.8	34.8	—	—	51.1	51.1	51	—	75.0	75.0	75	—
11.1	—	—	—	16.4	—	—	—	24.0	—	24	—	35.2	—	—	—	51.7	—	—	—	75.9	—	—	—
11.3	11.3	—	—	16.5	16.5	—	—	24.3	24.3	—	—	35.7	35.7	—	—	52.3	52.3	—	—	76.8	76.8	—	—
11.4	—	—	—	16.7	—	—	—	24.6	—	—	—	36.1	—	36	—	53.0	—	—	—	77.7	—	—	—
11.5	11.5	—	—	16.9	16.9	—	—	24.9	24.9	—	—	36.5	36.5	—	—	53.6	53.6	—	—	78.7	78.7	—	—
11.7	—	—	—	17.2	—	—	—	25.2	—	—	—	37.0	—	—	—	54.2	—	—	—	79.6	—	—	—
11.8	11.8	—	—	17.4	17.4	—	—	25.5	25.5	—	—	37.4	37.4	—	—	54.9	54.9	—	—	80.6	80.6	—	—
12.0	—	12	12	17.6	—	—	—	25.8	—	—	—	37.9	—	—	—	56.2	—	—	—	81.6	—	—	
12.1	12.1	—	—	17.8	17.8	—	—	26.1	26.1	—	—	38.3	38.3	—	—	56.6	56.6	56	56	82.5	82.5	82	82
12.3	—	—	—	18.0	—	18	18	26.4	—	—	—	38.8	—	—	—	56.9	—	—	—	83.5	—	—	—
12.4	12.4	—	—	18.2	18.2	—	—	26.7	26.7	—	—	39.2	39.2	39	39	57.6	57.6	—	—	84.5	84.5	—	—
12.6	—	—	—	18.4	—	—	—	27.1	—	27	27	39.7	—	—	—	58.3	—	—	—	85.6	—	—	—
12.7	12.7	—	—	18.7	18.7	—	—	27.4	27.4	—	—	40.2	40.2	—	—	59.0	59.0	—	—	86.6	86.6	—	—
12.9	—	—	—	18.9	—	—	—	27.7	—	—	—	40.7	—	—	—	59.7	—	—	—	87.6	—	—	—
13.0	13.0	13	—	19.1	19.1	—	—	28.0	28.0	—	—	41.2	41.2	—	—	60.4	60.4	—	—	88.7	88.7	—	—
13.2	—	—	—	19.3	—	—	—	28.4	—	—	—	41.7	—	—	—	61.2	—	—	—	89.8	—	—	—
13.3	13.3	—	—	19.6	19.6	—	—	28.7	28.7	—	—	42.2	42.2	—	—	61.9	61.9	62	—	90.9	90.9	91	—
13.5	—	—	—	19.8	—	—	—	29.1	—	—	—	42.7	—	—	—	62.6	—	—	—	92.0	—	—	—
13.7	13.7	—	—	20.0	20.0	20	—	29.4	29.4	—	—	43.2	43.2	43	—	63.4	63.4	—	—	93.1	93.1	—	—
13.8	—	—	—	20.3	—	—	—	29.8	—	—	—	43.7	—	—	—	64.2	—	—	—	94.2	—	—	—
14.0	14.0	—	—	20.5	20.5	—	—	30.1	30.1	30	—	44.2	44.2	—	—	64.9	64.9	—	—	95.3	95.3	—	—
14.2	—	—	—	20.8	—	—	—	30.5	—	—	—	44.8	—	—	—	65.7	—	—	—	96.5	—	—	—
14.3	14.3	—	—	21.0	21.0	—	—	30.9	30.9	—	—	45.3	45.3	—	—	66.5	66.5	—	—	97.6	97.6	—	—
14.5	—	—	—	21.3	—	—	—	31.2	—	—	-	45.9	—	—	—	67.3	—	—	—	98.8	—	—	—

注意:这些数值通常应用于 0.1,1,10,100,1 k 和 1 M 及其倍数上。

附录B 电 池 组

电池组是一种非常重要的直流电压源，从应用角度来说可以分为两大类：湿电池和干电池。通常来说，电池组是由几个独立电池构成的。

一个电池主要是由浸在电解质溶液中的两个电极组成的。电极与电解质溶液发生化学反应逐渐使两电极间形成一定的电压。电极通常使用两种不同的金属，电解质溶液是一种化学溶液。

B.1 简易湿电池

图 B.1 所示为一个简易的铜－锌化学电池，一个电极为铜片，另一个电极为锌片。两个电极都浸在电解质溶液中，电解质溶液是由水和盐酸混合而成的。

HCL 在水中电离形成正的氢离子(H^+)和负的氯离子(Cl^-)。因为锌元素比氢元素更活泼，故锌原子离开锌电极在溶液中生成锌离子(Zn^{++})。锌离子产生时，锌电极中留下两个过剩电子，此时两个氢离子从溶液中被置换，并转移到铜电极，从中获得两个电子，形成氢气(H_2)。上述反应使锌电极的负电荷逐渐增多，而铜电极的正电荷逐渐增加，在两个电极间逐渐形成电势差或电压。

在这种铜－锌电池中，氢气的释放使得铜电极的周围形成一层泡沫，将铜电极与电解质溶液隔绝开来，这种情况称为极化，其结果导致电池所产生的电压减小。通过在电解质溶液中添加一种去极化剂消除氢气或通过使用一种不会产生氢气的电解质溶液等都可以避免产生极化。

铅酸电池 如图 B.2 所示，铅酸电池的正电极是二氧化铅(PbO_2)，负电极是铅绒(Pb)。电解质溶液使用的是稀硫酸(H_2SO_4)。因此，铅酸电池是一种湿电池。

硫酸在水中电离产生两个正的氢离子($2H^+$)和一个负的硫酸根离子(SO_4^{--})。两个电极中的铅离子(Pb^{++})置换电解质溶液中的氢离子。铅离子从铅绒电极进入到溶液中，与硫酸根离子结合形成硫酸铅($PbSO_4$)，使电极中留下两个过剩电子。

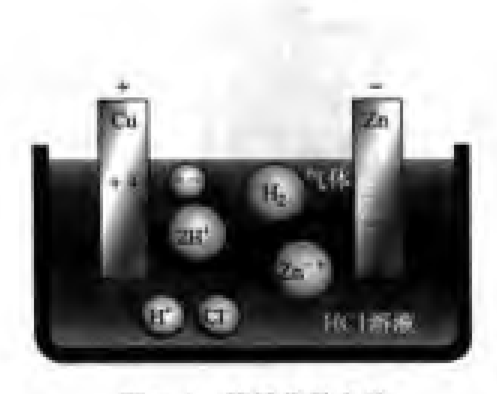


图 B.1 简易化学电池

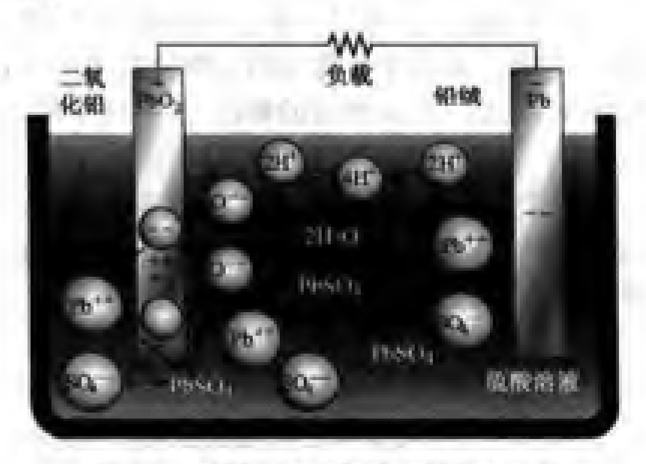


图 B.2 铅酸电池放电的化学反应过程

当铅离子从二氧化铅电极进入到溶液中，同样也会生成硫酸铅，并留下两个过剩电子。然而，由于该电极是由二氧化铅构成的，当铅原子离开电极进入溶液形成铅离子时，同时还产生了两个氧原子，这两个氧原子从二氧化铅电极中获得了四个电子而形成氧离子(O^{--})。这一过程使得二氧化铅电极反而变成缺少两个电子(最初该电极有两个过剩电子)。

两个氧离子($2O^{--}$)与四个氢离子($4H^+$)在溶液中结合形成两个水分子($2H_2O$)。这一过程在一段时间内逐渐稀释电解质溶液，并在电极上形成硫酸铅，这两个因素导致电池所产生的电压减少并需要重新充电。

如上所述，每分解出一个铅离子，铅绒电极中就会留下两个过剩电子，而二氧化铅电极中就会缺少两个电子。因此，二氧化铅电极为正极，铅绒电极为负极，该反应过程如图 B.2 所示。

前面提到，通过水和硫酸铅的生成，电解质溶液被稀释，需要通过上述化学反应的逆反应来重新给铅酸电池充电。可以再充电的电池称为蓄电池，不能重新充电的电池称为原电池。

如图 B.3 所示，电池的再充电是通过外加电压实现的。铅酸电池的化学反应方程式是：

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$$

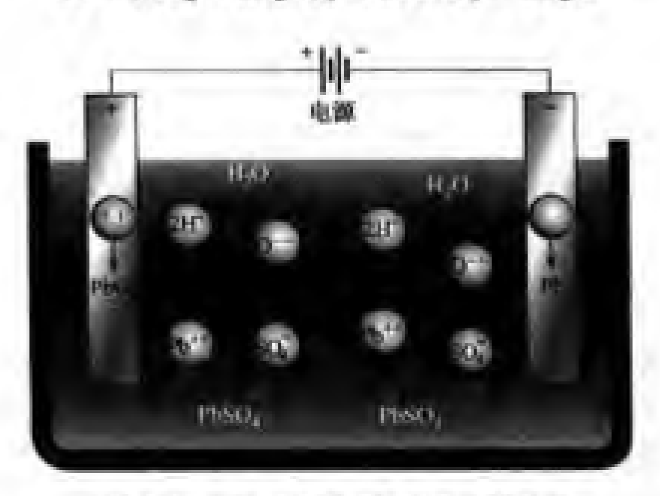


图 B.3 铅酸电池充电的化学反应过程

B.2 干电池

在干电池中，可以克服一些湿电池的缺点。实际上，通用干电池中的电解质溶液并不是干的，而是一种湿浆状的物质，是一种碳粒、粉状的二氧化锰和氯化铵溶液的化合物。

一个典型的碳－锌干电池如图 B.4 所示。锌罐在电解质溶液中溶解，然后在锌罐上逐渐形成过剩电子的堆积，使其变为负电极。

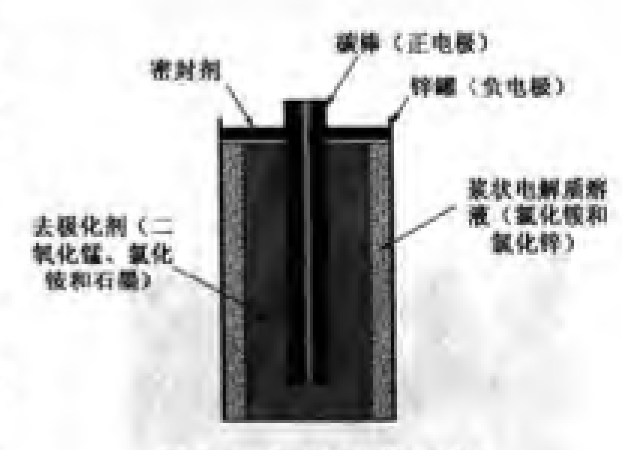


图 B.4 干电池的简易结构

电解质溶液中的氢离子从碳棒中获得电子，形成正电极。碳电极附近有氢气产生，但由于氢气与二氧化锰发生反应而被除去(称为去极化剂)，这种去极化过程防止了由于气体产生而使锌罐爆裂的可能。由于该化学反应是不可逆的，所以碳－锌电池是一种原电池。

B.3 化学电池的种类

前面只讨论了两种电池,还有其他一些类型,在表B.1中列出。

表B.1 电池的种类

类型	+电极	-电极	电解液	电压	注释(电池)
碳-锌	碳	锌	氯化锰和氯化锌	1.5	干,原
铅-酸	二氧化铅	铅绒	硫酸	2.0	湿,蓄
锰-碱	二氧化锰	锌	氢氧化钾	1.5	干,原或蓄
汞	锌	氧化汞	氢氧化钾	1.3	干,原
镍-镉	镍	氢氧化镉	氢氧化钾	1.25	干,蓄
镍-铁 (爱迪生电池)	氧化镍	铁	氢氧化钾	1.36	湿,蓄

附录C 公式推导

公式(11.6) 正弦电压的均方根(有效)值

"rms"是均方根的缩写，同时也表明了均方根的整个推导过程。首先将一个正弦波的表达式平方：

$$v^2 = V_p^2 \sin^2\theta$$

可以利用曲线的半个周期所包含的面积除以 π 得到 v^2 的平均值(参见图 C.1)，而该面积是通过积分和三角恒等式计算出来的。

$$\begin{aligned} V_{avg}^2 &= \frac{面积}{\pi} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_p^2 \sin^2\theta \, d\theta \\ &= \frac{V_p^2}{2\pi}\int_0^{\pi}(1-\cos 2\theta)d\theta = \frac{V_p^2}{2\pi}\int_0^{\pi} 1 \, d\theta - \frac{V_p^2}{2\pi}\int_0^{\pi}(-\cos 2\theta)\, d\theta \\ &= \frac{V_p^2}{2\pi}\left(\theta - \tfrac{1}{2}\sin 2\theta\right)_0^{\pi} = \frac{V_p^2}{2\pi}(\pi - 0) = \frac{V_p^2}{2} \end{aligned}$$

最后，V_{avg}^2的平方根是 V_{rms}。

$$V_{rms} = \sqrt{V_{avg}^2} = \sqrt{V_p^2/2} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = 0.707V_p$$



图 C.1

公式(11.12) 半周期正弦波形的平均值

之所以用半个周期来确定正弦波形的平均值，是因为一个完整周期的平均值为 0。

正弦波形的公式是：

$$v = V_p \sin\theta$$

半周期曲线所包含的面积除以其延横轴方向的水平距离，所得数值即为半周期正弦波形的平均值(参见图 C.2)。

$$V_{avg} = \frac{面积}{\pi}$$

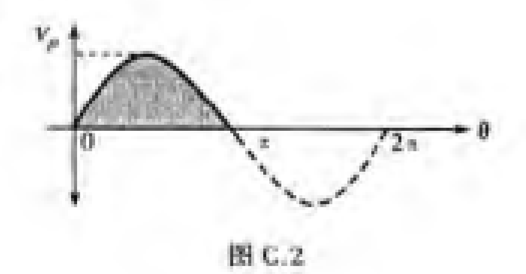


图 C.2

要求出面积,需要用到积分计算:

$$V_{avg}=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}V_p\sin\theta d\theta=\frac{V_p}{\pi}(-\cos\theta)\Big|_0^{\pi}$$

$$=\frac{V_p}{\pi}[-\cos\pi-(-\cos0)]=\frac{V_p}{\pi}[-(-1)-(-1)]$$

$$=\frac{V_p}{\pi}(2)=\frac{2}{\pi}V_p=0.637V_p$$

公式(13.26)和公式(14.15) 电抗公式推导

容抗公式的推导

$$\theta=2\pi ft=\omega t$$

$$i=C\frac{dv}{dt}=C\frac{d(V_p\sin\theta)}{dt}=C\frac{d(V_p\sin\omega t)}{dt}=\omega C(V_p\cos\omega t)$$

$$I_{rms}=\omega CV_{rms}$$

$$X_C=\frac{V_{rms}}{I_{rms}}=\frac{V_{rms}}{\omega CV_{rms}}=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}$$

感抗公式的推导

$$v=L\frac{di}{dt}=L\frac{d(I_p\sin\omega t)}{dt}=\omega L(I_p\cos\omega t)$$

$$V_{rms}=\omega LI_{rms}$$

$$X_L=\frac{V_{rms}}{I_{rms}}=\frac{\omega LI_{rms}}{I_{rms}}=\omega L=2\pi fL$$

公式(18.15) 非理想的并联谐振回路的谐振频率

$$\frac{1}{\mathbf{Z}}=\frac{1}{-jX_C}+\frac{1}{R_W+jX_L}$$

$$=j\left(\frac{1}{X_C}\right)+\frac{R_W-jX_L}{(R_W+jX_L)(R_W-jX_L)}=j\left(\frac{1}{X_C}\right)+\frac{R_W-jX_L}{R_W^2+X_L^2}$$

将第二项的分子拆开形成两个分式,再与首项相加:

$$\frac{1}{\mathbf{Z}}=j\left(\frac{1}{X_C}\right)-j\left(\frac{X_L}{R_W^2+X_L^2}\right)+\frac{R_W}{R_W^2+X_L^2}$$

由于 j 项数值应该相等:

$$\frac{1}{X_C}=\frac{X_L}{R_W^2+X_L^2}$$

因此,

$$R_W^2=X_L^2=X_LX_C$$

$$R_W^2+(2\pi f_rL)^2=\frac{2\pi f_rL}{2\pi f_rC}$$

$$R_W^2+4\pi^2f_r^2L^2=\frac{L}{C}$$

$$4\pi^2f_r^2L^2=\frac{L}{C}-R_W^2$$

解出 f_r^2:

$$f_r^2 = \frac{\left(\frac{L}{C}\right) - R_W^2}{4\pi^2 L^2}$$

分子、分母同乘以 C:

$$f_r^2 = \frac{L - R_W^2 C}{4\pi^2 L^2 C} = \frac{L - R_W^2 C}{L(4\pi^2 LC)}$$

因式分解从分子中提取 L,然后消项:

$$f_r^2 = \frac{1 - (R_W^2 C/L)}{4\pi^2 LC}$$

等式两边开平方即得 f_r:

$$f_r = \frac{\sqrt{1 - (R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}}$$

公式(18.18) 非理想并联谐振回路的阻抗

从前面公式(18.15)的推导中 $1/\mathbf{Z}$ 的表达式开始:

$$\frac{1}{\mathbf{Z}} = j\left(\frac{1}{X_C}\right) - j\left(\frac{X_L}{R_W^2 + X_L^2}\right) + \frac{R_W}{R_W^2 + X_L^2}$$

谐振时 $\mathbf{Z}$ 为纯阻性,所以该表达式中不含 j 部分(即 j 项在最后的表达式中是消去的),故只有左边的实数部分。谐振时 Z 的公式如下:

$$\mathbf{Z}_r = \frac{R_W^2 + X_L^2}{R_W}$$

将分子拆开,可以得到:

$$Z_r = \frac{R_W^2}{R_W} + \frac{X_L^2}{R_W} = R_W + \frac{X_L^2}{R_W}$$

因式分解提出 R_W,得:

$$Z_r = R_W\left(1 + \frac{X_L^2}{R_W^2}\right)$$

因为 $X_L^2/R_W^2 = Q^2$,则:

$$Z_r = R_W(Q^2 + 1)$$

附录 D　电容的色标

有一些电容器上会标有色标，这种用于电容上的色标与电阻上的基本相同，只是在误差标记上有些变化。表 D.1 中列出了一些基本色标，一些典型的色标电容参见图 D.1。

表 D.1　典型的电容色标(pF)

色环	十进制数	乘数	误差
黑色	0	1	20%
棕色	1	10	1%
红色	2	100	2%
橙色	3	1000	3%
黄色	4	10 000	
绿色	5	100 000	5%(EIA)
蓝色	6	1 000 000	
紫色	7		
灰色	8		
白色	9		
金色		0.1	5%(JAN)
银色		0.01	10%

注：EIA 是指电子工业协会；JAN 是指海陆联军，是一种军用标准。

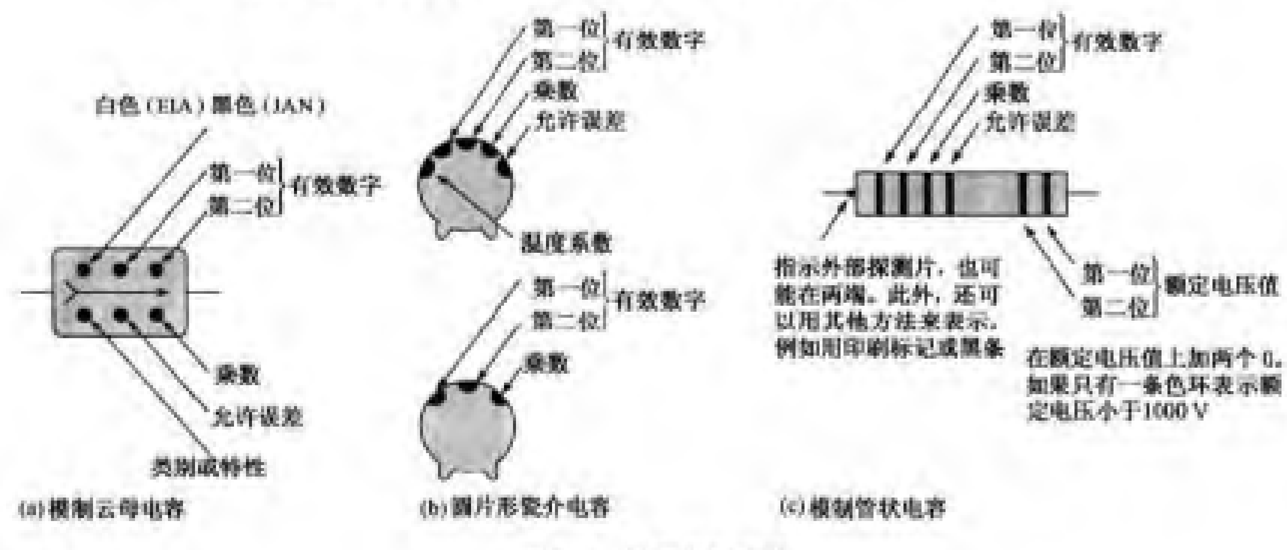


图 D.1　典型色标电容

D.1　标记系统

图 D.2 中的电容有固定的识别标志。

- 其主体是由一种单一颜色(米色、浅褐色、灰色、棕褐色或棕色)构成的
- 两端的电极完全将尾部封装起来。

■ 有很多不同的尺寸：

1. 型号 1206：0.125 英寸长，0.063 英寸宽(3.2 mm × 1.6 mm)，且高度和颜色可变。
2. 型号 0805：0.080 英寸长，0.050 英寸宽(2.0 mm × 1.25 mm)，且高度和颜色可变。
3. 尺寸可变但颜色单一(通常为半透明的棕褐色或棕色)。长度范围为 0.059 英寸(1.5 mm)到 0.220 英寸(5.6 mm)之间，宽度范围为 0.032 英寸(0.8 mm)到 0.197 英寸(5.0 mm)之间。

■ 三种不同的标记系统：

1. 两位(只有字母和数字)
2. 两位(字母和数字或两个数字)
3. 一位(颜色可变的字母)

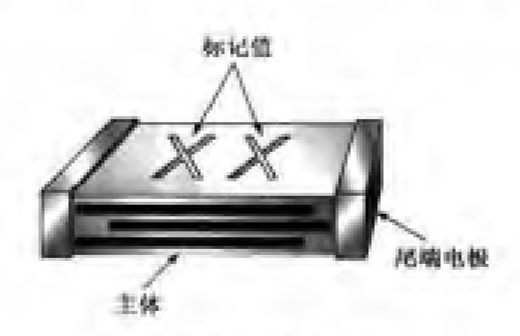
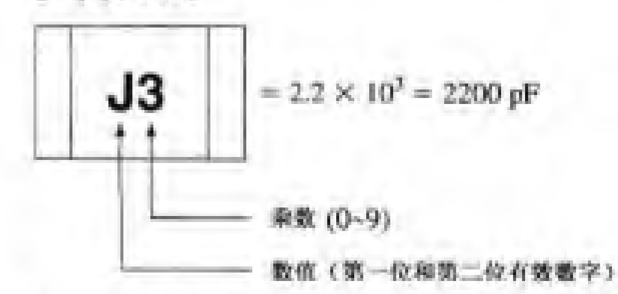


图 D.2 电容标记



D.2 标准两位标记码

参考表 D.2。



例：S2 = 4.7 × 100 = 470 pF
　　b0 = 3.5 × 1.0 = 3.5 pF

表 D.2

数值*			乘数
A 1.0	L 2.7	T 5.1	0 = ×1.0
B 1.1	M 3.0	U 5.6	1 = ×10
C 1.2	N 3.3	m 6.0	2 = ×100
D 1.3	b 3.5	V 6.2	3 = ×1000
E 1.5	P 3.6	W 6.8	4 = ×10 000
F 1.6	Q 3.9	n 7.0	5 = ×100 000
G 1.8	d 4.0	X 7.5	…
H 2.0	R 4.3	t 8.0	
J 2.2	e 4.5	Y 8.2	
K 2.4	S 4.7	y 9.0	
a 2.5	f 5.0	Z 9.1	

* 注意大小写字母。

D.3 变更的两位标记码

参考表 D.3。

■ 100 pF 以下的电容——可以直接读数

| 05 | = 5 pF |　| 82 | = 82 pF |

■ 100 pF 以上的电容——字母/数字标记

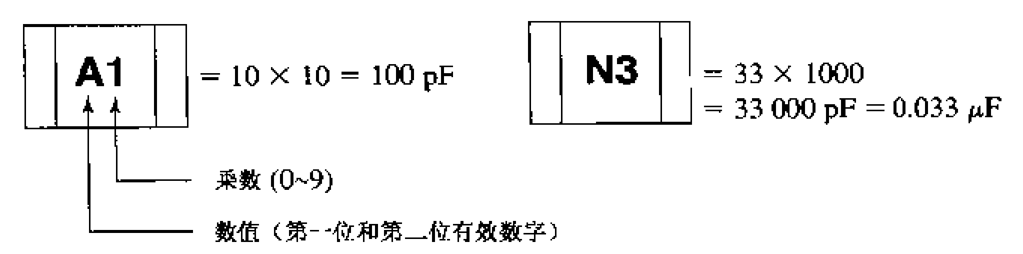


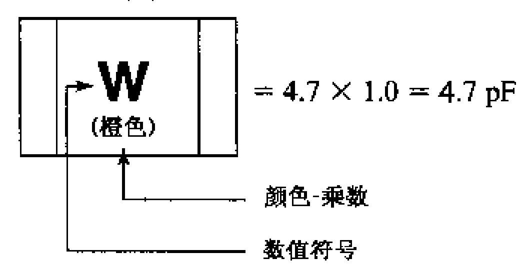
表 D.3

数值*			乘数
A　10	J　22	S　47	1 = ×10
B　11	K　24	T　51	2 = ×100
C　12	L　27	U　56	3 = ×1000
D　13	M　30	V　62	4 = ×10 000
E　15	N　33	W　68	5 = ×100 000
F　16	P　36	X　75	…
G　18	Q　39	Y　82	
H　20	R　43	Z　91	

*注意只有大写字母。

D.4　标准一位标记码

参考表 D.4。



例：R(绿) = 3.3 × 100 = 330 pF

7(蓝) = 8.2 × 1000 = 8200 pF

表 D.4

数值			乘数(颜色)
A　1.0	K　2.2	W　4.7	橙色 = ×1.0
B　1.1	L　2.4	X　5.1	黑色 = ×10
C　1.2	N　2.7	Y　5.6	绿色 = ×100
D　1.3	O　3.0	Z　6.2	蓝色 = ×1000
E　1.5	R　3.3	3　6.8	紫色 = ×10 000
H　1.6	S　3.6	4　7.5	红色 = ×100 000
I　1.8	T　3.9	7　8.2	
J　2.0	V　4.3	9　9.1	

奇数序号的习题答案

第1章

1. (a) 3×10^3 (b) 7.5×10^4
   (c) 2×10^6
3. (a) 8.4×10^3 (b) 9.9×10^4
   (c) 2×10^5
5. (a) 0.000 002 5 (b) 500
   (c) 0.39
7. (a) 4.32×10^7 (b) $5.000\ 85\times10^3$
   (c) 6.06×10^{-8}
9. (a) 2.0×10^9 (b) 3.6×10^{14}
   (c) 1.54×10^{-14}
11. (a) 89×10^3 (b) 450×10^3
    (c) 12.04×10^{12}
13. (a) 345×10^{-6} (b) 25×10^{-3}
    (c) 1.29×10^{-9}
15. (a) 7.1×10^{-3} (b) 101×10^6
    (c) 1.50×10^6
17. (a) 22.7×10^{-3} (b) 200×10^6
    (c) 848×10^{-3}
19. (a) 345 μA (b) 25 mA
    (c) 1.29 nA
21. (a) 3 μF (b) 3.3 MΩ
    (c) 350 nA
23. (a) 5000 μA (b) 3.2 mW
    (c) 5 MV (d) 10 000 kW
25. (a) 50.68 mA (b) 2.32 MΩ
    (c) 0.0233 μF

第2章

1. 80×10^{12} C
3. (a) 10 V (b) 2.5 V (c) 4 V
5. 20 V
7. 33.3 V
9. 0.2 A
11. 0.15 C
13. (a) 27 kΩ ± 5%
    (b) 1.8 kΩ ± 10%
15. 330 Ω:橙色、橙色、棕色
    2.2 kΩ:红色、红色、红色
    56 kΩ:绿色、蓝色、橙色
    100 kΩ:棕色、黑色、黄色
    39 kΩ:橙色、白色、橙色
17. (a) 200 mS (b) 40 mS (c) 10 mS
19. AWG # 27
21. 流过灯泡 2
23. 电路图(b)
25. 参见图 P.1

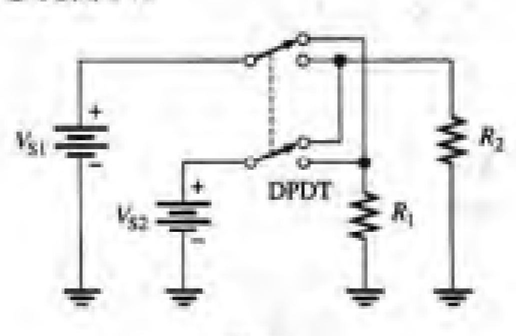


图 P.1

27. 参加图 P.2。

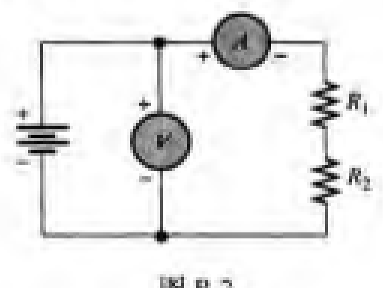
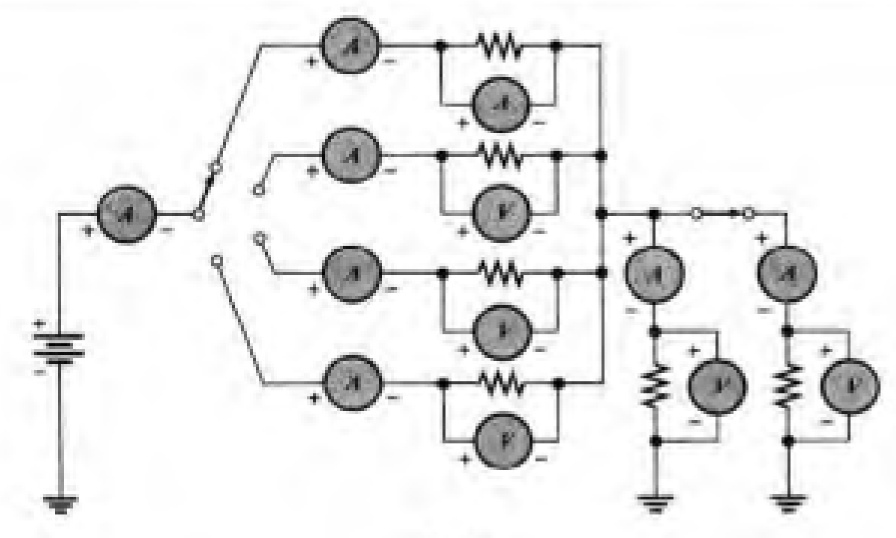
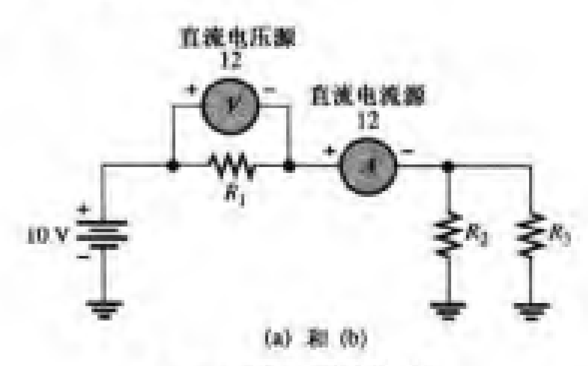


图 P.2

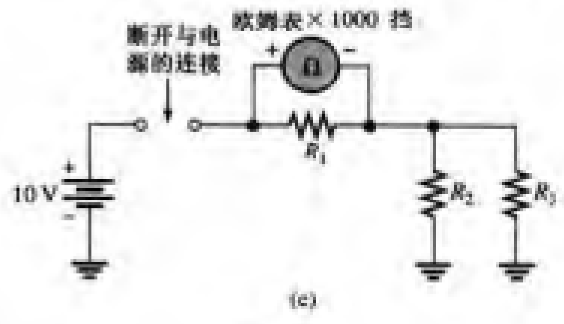
29. 置于 1 点:V1 = 0 V, V2 = V_S
    置于 2 点:V1 = V_S, V2 = 0 V
31. 参见图 P.3


图 P.3

33. (a) 0.25 V (b) 250 V
35. (a) 20 Ω (b) 1.50 MΩ
    (c) 4500Ω
37. 参见图 P.4



(a) 和 (b)



(c)

图 P.4

第 3 章

1. (a) 电流的 3 倍
   (b) 电流减少 75%
   (c) 电流减半
   (d) 电流增加 54%
   (e) 电流的 4 倍
   (f) 电流不变
3. $V = IR$
5. (a) 5 A (b) 1.5 A
   (c) 500 mA (d) 2 mA
   (e) 44.6 μA
7. 1.2 A
9. 532 μA
11. (a) 36 V (b) 280 V
    (c) 1700 V (d) 28.2 V
    (e) 56 V
13. 81 V
15. (a) 59.9 mA (b) 5.99 V
    (c) 4.61 mV
17. (a) 2 kΩ (b) 3.5 kΩ
    (c) 2 kΩ (d) 100 kΩ
    (e) 1.0 MΩ
19. 150 Ω
21. 133 Ω;100 Ω;如果变阻器置于 0 时,电源可能被短路。
23. 图中是一条直线,这说明 V 和 I 间是呈线性关系。
25. $R_1 = 0.5\ \Omega, R_2 = 1.0\ \Omega, R_3 = 2\ \Omega$
27. 电压下降了 4 V(从 10 V 降到 6 V)。
29. 参见图 P.5

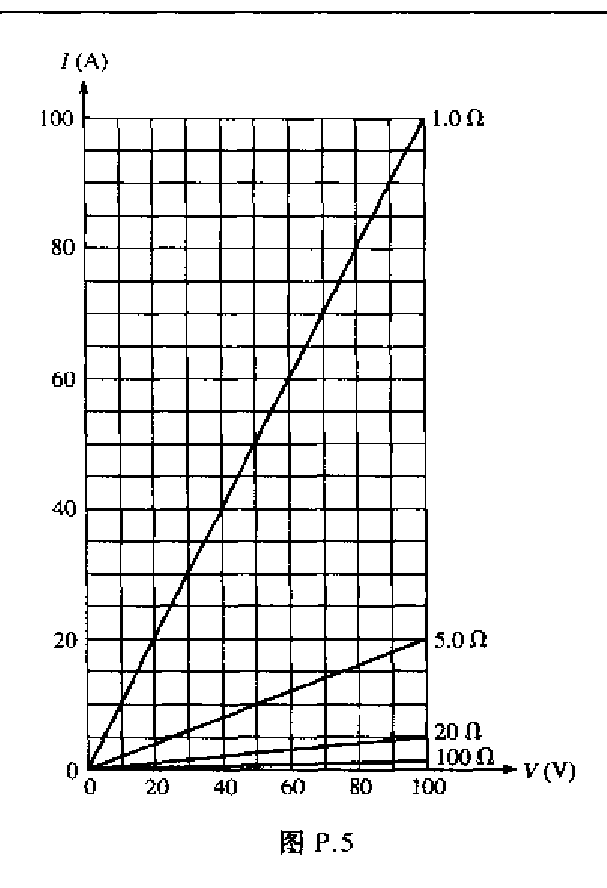


图 P.5

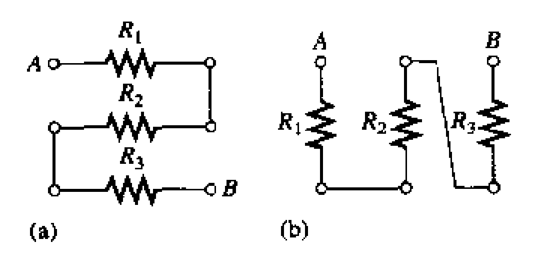
31. 5 号灯泡

第 4 章

1. 350 W
3. 20 kW
5. (a) 1 MW (b) 3 MW
   (c) 150 MW (d) 8.7 MW
7. (a) 2 000 000 μW (b) 500 μW
   (c) 250 μW (d) 6.67 μW
9. 8640 J
11. 2.02 kW/天
13. 0.001 86 kWh
15. 37.5 Ω
17. 360 W
19. 100 μW
21. 40.2 mW
23. (a) 0.480 Wh (b) 保持不变
25. 至少为 12 W,因为需要有一个允许安全范围
27. 7.07 V
29. 8 A
31. 100 mW,80%
33. 0.08 kWh

第 5 章

1. 参见图 P.6



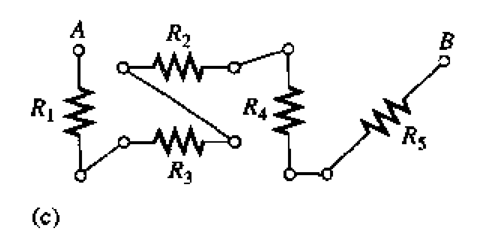


图 P.6

3. R_1,R_7,R_8 和 R_{10}是串联关系
   R_2,R_4,R_6 和 R_{11}是串联关系
   R_3,R_5,R_9 和 R_{12}是串联关系
5. 5 mA
7. 参见图 P.7

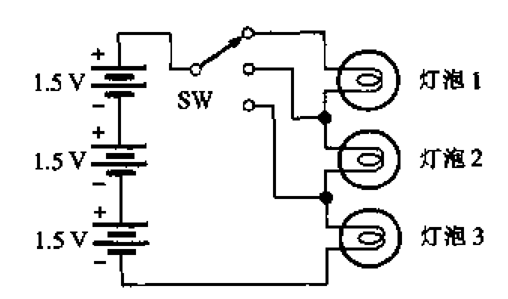


图 P.7

9. (a) 1560 Ω (b) 103 Ω
   (c) 13.7 kΩ (d) 3.671 MΩ
11. 67.2 kΩ
13. 3.9 kΩ
15. 17.8 MΩ
17. (a) 625 μA (b) 4.26 μA
19. 355 mA
21. R_1 = 330 Ω, R_2 = 220 Ω,
    R_3 = 100 Ω, R_4 = 470 Ω
23. 置于 A:5.45 mA 置于 B:6.06 mA
    置于 C:7.95 mA 置于 D:12 mA

25. 14 V

27. (a) 23 V (b) 35 V (c) 0 V

29. 4 V

31. 22 Ω

33. 置于 A:4.0 V 置于 B:4.5 V
置于 C:5.4 V 置于 D:7.2 V

35. 4.82%

37. $V_R = 6$ V, $V_{2R} = 12$ V, $V_{3R} = 18$ V,
$V_{4R} = 24$ V, $V_{5R} = 30$ V

39. $V_2 = 1.79$ V, $V_3 = 1$ V, $V_4 = 17.9$ V

41. 参见图 P.8

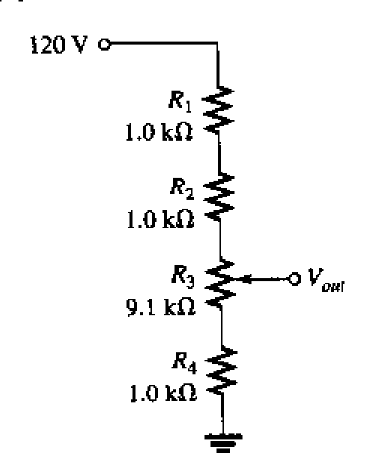


图 P.8

43. 54.9 mW

45. 12.5 MΩ

47. $V_A = 100$ V, $V_B = 57.7$ V,
$V_C = 15.2$ V, $V_D = 7.58$ V

49. $V_A = 14.82$ V, $V_B = 12.97$ V,
$V_C = 12.64$ V, $V_D = 9.34$ V

51. (a) R_4 开路 (b) A 到 B 短路

53. 表 5.1 是正确的。

55. 是的,引线 4 与 R_{11}上部短路

第 6 章

1. 参见图 P.9

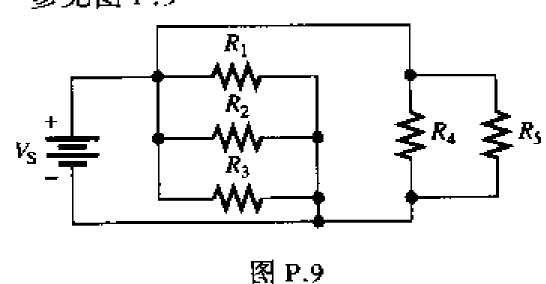


图 P.9

3. $R_1, R_2, R_5, R_9, R_{10}$和 R_{12}是并联关系
R_4, R_6, R_7 和 R_8 是并联关系
R_3 和 R_{11}是并联关系

5. 100 V

7. 1.35 A

9. $R_2 = 22\ \Omega, R_3 = 100\ \Omega, R_4 = 33\ \Omega$

11. 11.4 mA

13. (a) 359 Ω (b) 25.6 Ω
(c) 819 Ω (d) 997 Ω

15. 567 Ω

17. 2.46 Ω

19. (a) 510 kΩ (b) 245 kΩ
(c) 510 kΩ (d) 193 kΩ

21. 10 A

23. 50 mA;因为当一个灯泡烧毁时,其他灯泡仍能够继续工作。

25. 53.7 Ω

27. $I_2 = 167$ mA, $I_3 = 83.3$ mA, $I_T = 300$ mA
$R_1 = 2$ kΩ, $R_2 = 600$ Ω

29. 置于 A:2.25 mA
置于 B:4.75 mA
置于 C:7 mA

31. (a) $I_1 = 6.88\ \mu$A, $I_2 = 3.12\ \mu$A,
(b) $I_1 = 5.25$ mA, $I_2 = 2.39$ mA,
$I_3 = 1.59$ mA, $I_4 = 772\ \mu$A

33. $R_1 = 3.3$ kΩ, $R_2 = 1.8$ kΩ,
$R_3 = 5.6$ kΩ, $R_4 = 3.9$ kΩ

35. 0.05 Ω

37. (a) 68.8 μW (b) 52.5 mW

39. $P_1 = 1.25$ W, $I_2 = 75$ mA, $I_1 = 125$ mA,
$V_S = 10$ V, $R_1 = 80\ \Omega$, $R_2 = 133\ \Omega$

41. 682 mA, 3.41 A

43. 8.2 kΩ 的电阻开路。

45. 在两根引线 1 和 2 间接入欧姆表
正确读数: $R = 1.0\text{ k}\Omega \| 3.3\text{ k}\Omega = 767\ \Omega$
R_1 开路: $R = 3.3$ kΩ
R_2 开路: $R = 1.0$ kΩ
在两根引线 3 和 4 间接入欧姆表
正确读数: $R = 270\ \Omega \| 390\ \Omega = 159.5\ \Omega$

R_3 开路:$R = 390\ \Omega$

R_4 开路:$R = 270\ \Omega$

在两根引线 5 和 6 间接入欧姆表

正确读数:

$R = 1.0\ \mathrm{M\Omega} \| 1.8\ \mathrm{M\Omega} \| 680\ \mathrm{k\Omega} \| 510\ \mathrm{k\Omega} = 201\ \mathrm{k\Omega}$

R_5 开路:$R = 1.8\ \mathrm{M\Omega} \| 680\ \mathrm{k\Omega} \| 510\ \mathrm{k\Omega} = 251\ \mathrm{k\Omega}$

R_6 开路:$R = 1.0\ \mathrm{M\Omega} \| 680\ \mathrm{k\Omega} \| 510\ \mathrm{k\Omega} = 226\ \mathrm{k\Omega}$

R_7 开路:$R = 1.0\ \mathrm{M\Omega} \| 1.8\ \mathrm{M\Omega} \| 510\ \mathrm{k\Omega} = 284\ \mathrm{k\Omega}$

R_8 开路:$R = 1.0\ \mathrm{M\Omega} \| 1.8\ \mathrm{M\Omega} \| 680\ \mathrm{k\Omega} = 330\ \mathrm{k\Omega}$

47. 引线 3 和 4 间短路

(a) $R_{1\text{-}2} = (R_1 \| R_2 \| R_3 \| R_4 \| R_{11} \| R_{12}) + (R_5 \| R_6 \| R_7 \| R_8 \| R_9 \| R_{10}) = 940\ \Omega$

(b) $R_{2\text{-}3} = R_5 \| R_6 \| R_7 \| R_8 \| R_9 \| R_{10} = 518\ \Omega$

(c) $R_{2\text{-}4} = R_5 \| R_6 \| R_7 \| R_8 \| R_9 \| R_{10} = 518\ \Omega$

(d) $R_{1\text{-}4} = R_1 \| R_2 \| R_3 \| R_4 \| R_{11} \| R_{12} = 422\ \Omega$

第 7 章

1. 参见图 P.10

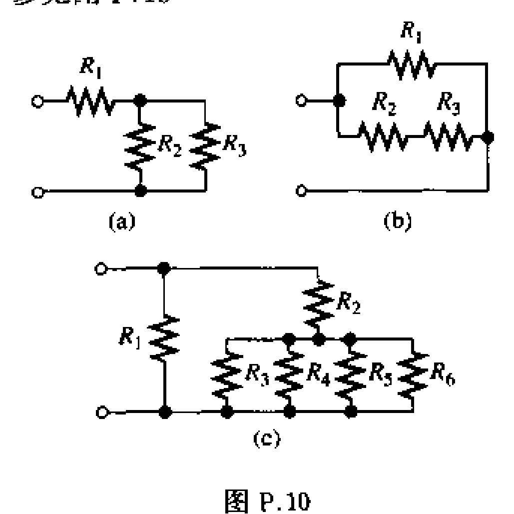


图 P.10

3. (a) R_1 与 R_4 串联,与 R_2 和 R_3 并联。

(b) R_2,R_3 和 R_4 并联后再与 R_1 串联。

(c) R_2 和 R_3 的并联与 R_4 和 R_5 的并联相串联,然后再与 R_1 并联。

5. 参见图 P.11

7. 参见图 P.12

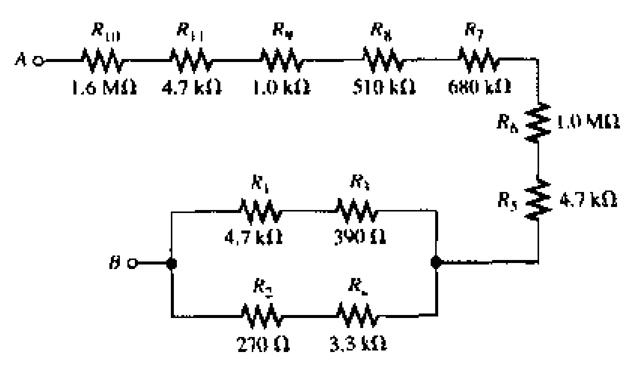


图 P.11

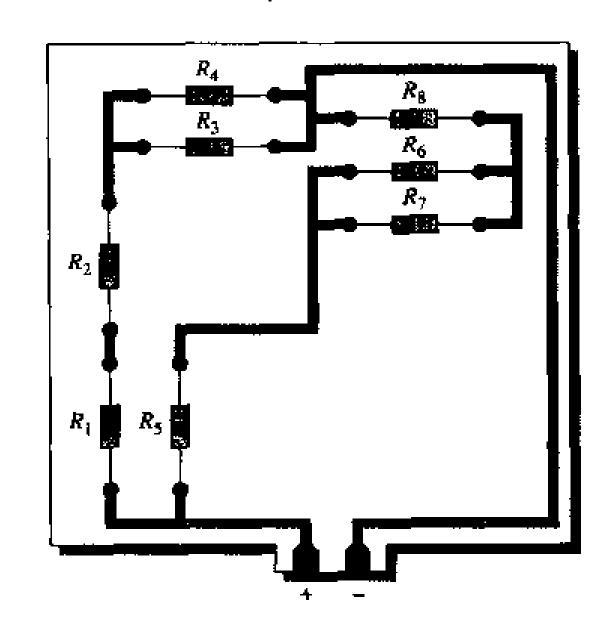


图 P.12

9. (a) 133 Ω (b) 779 Ω (c) 852 Ω

11. (a) $I_1 = I_4 = 11.3\ \mathrm{mA}, I_2 = I_3 = 5.64\ \mathrm{mA}$, $V_1 = 633\ \mathrm{mV}, V_2 = V_3 = 564\ \mathrm{mV}$, $V_4 = 305\ \mathrm{mV}$

(b) $I_1 = 3.85\ \mathrm{mA}, I_2 = 563\ \mu\mathrm{A}$, $I_3 = 1.16\ \mathrm{mA}, I_4 = 2.13\ \mathrm{mA}$, $V_1 = 2.62\ \mathrm{V}, V_2 = V_3 = V_4 = 383\ \mathrm{mV}$

(c) $I_1 = 5\ \mathrm{mA}, I_2 = 303\ \mu\mathrm{A}, I_3 = 568\ \mu\mathrm{A}$, $I_4 = 313\ \mu\mathrm{A},\ I_5 = 558\ \mu\mathrm{A}$ $V_1 = 5\ \mathrm{V}, V_2 = V_3 = 1.88\ \mathrm{V}$, $V_4 = V_5 = 3.13\ \mathrm{V}$

13. SW1 闭合,SW2 断开:220 Ω

SW1 闭合,SW2 闭合:200 Ω

SW1 断开,SW2 断开:320 Ω

SW1 断开,SW2 闭合:300 Ω

15. $V_A = 100\ \mathrm{V}, V_B = 61.5\ \mathrm{V}$,

$V_C = 15.7\ \text{V}, V_D = 7.87\ \text{V}$

17. 测量 A 点和 B 点分别对接地点的电压，然后将二者相减之差为 V_{R2}。
19. 110 Ω
21. $R_{AB} = 1.32\ \text{k}\Omega$　　$R_{BC} = 1.32\ \text{k}\Omega$
    $R_{CD} = 0\ \Omega$
23. 无负载：7.5 V，有负载：7.29 V
25. 47 kΩ
27. $R_1 = 1000\ \Omega; R_2 = R_3 = 500\ \Omega$;
    较低的触点连接的负载：
    $V_{lower} = 1.82\ \text{V}, V_{upper} = 4.55\ \text{V}$
    较高的触点连接的负载：
    $V_{lower} = 1.67\ \text{V}, V_{upper} = 3.33\ \text{V}$
29. (a) $V_G = 1.75\ \text{V}, V_S = 3.25\ \text{V}$
    (b) $I_1 = I_2 = 6.48\ \mu\text{A}, I_D = I_S = 2.17\ \text{mA}$
    (c) $V_{DS} = 2.55\ \text{V}, V_{DG} = 4.05\ \text{V}$
31. 1000 V
33. (a) 0.5 V 范围　　(b) 大约 1 mV
35. (a) 271 Ω　　(b) 221 mA
    (c) 58.7 mA(d) 12 V
37. $621\ \Omega, I_1 = I_9 = 16.1\ \text{mA}, I_2 = 8.27\ \text{mA}$,
    $I_3 = I_8 = 7.84\ \text{mA}, I_4 = 4.06\ \text{mA}$,
    $I_5 = I_6 = I_7 = 3.78\ \text{mA}$
39. 971 mA
41. (a) 9 V　　(b) 3.75 V
    (c) 11.25 V
43. 2184 Ω
45. 不正确，应该是 4.39 V。
47. 2.2 kΩ(R_3)是开路的。
49. 3.3 kΩ(R_4)是开路的。

第 8 章

1. $I_S = 6\ \text{A}, R_S = 50\ \Omega$
3. $V_S = 720\ \text{V}, R_S = 1.2\ \text{k}\Omega$
5. 845 μA
7. 1.6 mA
9. 90.7 V
11. $I_{S1} = 2.28\ \text{mA}, I_{S2} = 1.35\ \text{mA}$
13. 116 μA
15. $R_{TH} = 88.6\ \Omega, V_{TH} = 1.09\ \text{V}$
17. 100 μA
19. (a) $I_N = 110\ \text{mA}, R_N = 76.7\ \Omega$
    (b) $I_N = 11.1\ \text{mA}, R_N = 73\ \Omega$
    (c) $I_N = 50\ \mu\text{A}, R_N = 35.9\ \text{k}\Omega$
    (d) $I_N = 68.8\ \text{mA}, R_N = 1.3\ \text{k}\Omega$
21. 17.9 V
23. $I_N = 953\ \mu\text{A}, R_N = 1175\ \Omega$
25. $I_N = -48.2\ \text{mA}, R_N = 56.9\ \Omega$
27. 11.1 Ω
29. $R_{TH} = 48\ \Omega, R_4 = 160\ \Omega$
31. (a) $R_A = 39.8\ \Omega, R_B = 73\ \Omega$,
        $R_C = 48.7\ \Omega$
    (b) $R_A = 21.2\ \text{k}\Omega, R_B = 10.3\ \text{k}\Omega$,
        $R_C = 14.9\ \text{k}\Omega$

第 9 章

1. 六号回路
3. $I_{R1} - I_{R2} - I_{R3} = 0$
5. $V_1 = 5.66\ \text{V}, V_2 = 6.33\ \text{V}$,
   $V_3 = 325\ \text{mV}$
7. $I_{R1} = 738\ \text{mA}, I_{R2} = -527\ \text{mA}$,
   $I_{R3} = -469\ \text{mA}$
9. −1.84 V
11. $I_1 = 0\ \text{A}, I_2 = 2\ \text{A}$
13. (a) −16 470　　(b) −1.59
15. $I_1 = 1.24\ \text{A}, I_2 = 2.05\ \text{A}, I_3 = 1.89\ \text{A}$
17. X1 = .371428571429($I_1 = 371\ \text{mA}$)
    X2 = −.142857142857($I_2 = -143\ \text{mA}$)
19. X1 = 1.23529411765($I_1 = 1.24\ \text{A}$)
    X2 = 2.05347593583($I_2 = 2.05\ \text{A}$)
    X3 = 1.88502673797($I_3 = 1.89\ \text{A}$)
21. $I_1 = -5.11\ \text{mA}, I_2 = -3.52\ \text{mA}$
23. $V_1 = 5.11\ \text{V}, V_3 = 890\ \text{mV}, V_2 = 2.89\ \text{V}$
25. $I_1 = 15.6\ \text{mA}, I_2 = -61.3\ \text{mA}$,
    $I_3 = 61.5\ \text{mA}$
27. −11.2 mV
29. 2.7 mA
31. $I_{R1} = 20.6\ \text{mA}, I_{R3} = 193\ \text{mA}$,
    $I_{R2} = -172\ \text{mA}$

33. $V_A = 1.5$ V, $V_B = -5.65$ V

35. $I_{R1} = 193$ μA, $I_{R2} = 370$ μA, $I_{R3} = 179$ μA,
$I_{R4} = 328$ μA, $I_{R5} = 1.46$ mA, $I_{R6} = 522$ μA,
$I_{R7} = 2.16$ mA, $I_{R8} = 1.64$ mA,
$V_A = -3.70$ V, $V_B = -5.85$ V,
$V_C = -15.7$ V

第 10 章

1. 减小
3. 37.5 μWb
5. 597
7. 150 At
9. (a) 电磁场　(b) 弹力
11. 由电磁场和永磁场相互作用产生的力
13. 改变电流
15. A 物质
17. 1 mA
19. 楞次定律定义了感应电压的极性。
21. 整流器和电刷的作用是将外部电源接入回路中。
23. 参见图 P.13

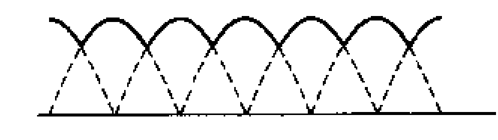


图 P.13

第 11 章

1. (a) 1 Hz　(b) 5 Hz　(c) 20 Hz
(d) 1 kHz　(e) 2 kHz　(f) 100 kHz
3. 2 μs
5. 250 Hz
7. 200 rps
9. (a) 7.07 mA
(b) 0 A(整个周期), 4.5 mA(半个周期)
(c) 14.14 mA
11. (a) 0.524 或 π/6 rad
(b) 0.785 或 π/4 rad
(c) 1.361 或 39π/90 rad
(d) 2.356 或 3π/4 rad
(e) 3.491 或 10π/9 rad
(f) 5.236 或 5π/3 rad
13. 15°, A 超前
15. 参见图 P.14

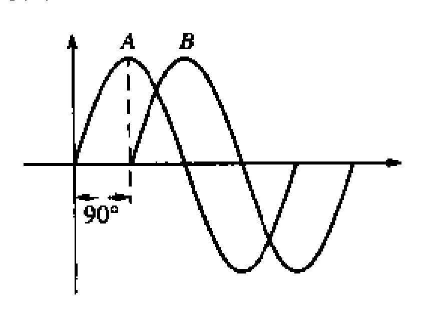


图 P.14

17. (a) 57.4 mA　(b) 99.6 mA
(c) −17.4 mA　(d) −57.4 mA
(e) −99.6 mA　(f) 0 mA
19. 30°: 13.0 V　45°: 14.5 V
90°: 13.0 V　180°: −7.5 V
200°: −11.5 V　300°: −7.5 V
21. 22.1 V
23. $V_{R1(avg)} = 40.5$ V, $V_{R2(avg)} = 31.5$ V
25. $V_{max} = 39$ V, $V_{min} = 9$ V
27. −1 V
29. $t_r \cong 3.5$ ms, $t_f \cong 3.5$ ms,
$t_W \cong 12.5$ ms, Ampl. ≅ 5 V
31. 5.84 V
33. (a) −0.375 V　(b) 3.01 V
35. (a) 50 kHz　(b) 10 Hz
37. 75 kHz, 125 kHz, 175 kHz,
225 kHz, 275 kHz, 325 kHz
39. $V_p = 600$ mV, $T = 500$ ms
41. Ampl = 1.4 V, $t_W = 120$ ms,
$T = 400$ ms, %dc = 30%
43. $V_{p(in)} = 4.44$ V, $f_{in} = 2$ Hz

第 12 章

1. 参见图 P.15

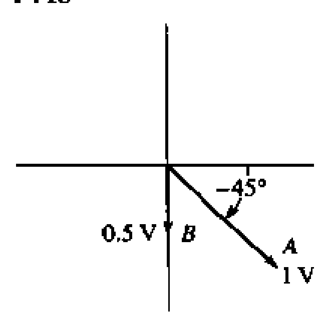


图 P.15

3. (a) 9.55 Hz (b) 57.3 Hz
   (c) 0.318 Hz (d) 200 Hz
5. 54.5 μs
7. 参见图 P.16

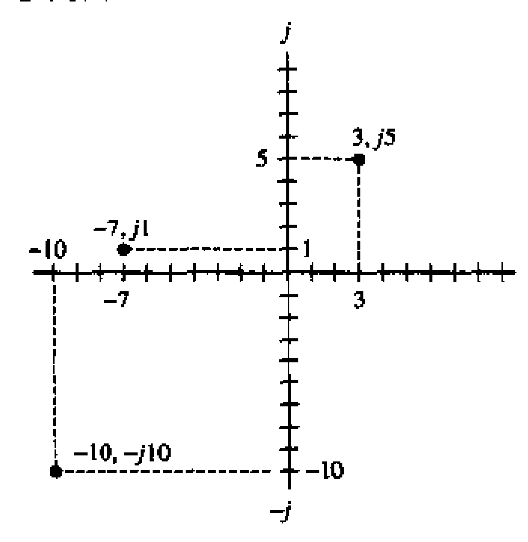
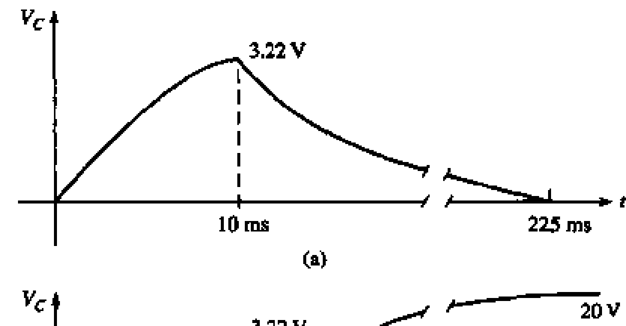


图 P.16

9. (a) −5, +j3 和 5, −j3
   (b) −1, −j7 和 1, +j7
   (c) −10, +j10 和 10, −j10
11. 18.0
13. (a) 643 − j766 (b) −14.1 + j5.13
    (c) −17.7 − j17.7 (d) −3 + j0
15. (a) 第四象限 (b) 第四象限
    (c) 第四象限 (d) 第一象限
17. (a) 12∠115° (b) 20∠230°
    (c) 100∠190° (d) 50∠160°
19. (a) 1.1 + j0.7 (b) −81 − j35
    (c) 5.28 − j5.27 (d) −50.4 + j62.5
21. (a) 3.2∠11° (b) 7∠−101°
    (c) 1.52∠70.6° (d) 2.79∠−63.5°
23. 9.87∠−8.80° V, 1.97∠−8.80° mA

第 13 章

1. (a) 5 μF (b) 1 μC (c) 10 V
3. (a) 0.001 μF (b) 0.0035 μF
   (c) 0.000 25 μF
5. 2.3×10^{-22} 牛顿
7. (a) 8.85×10^{-12} F/m
   (b) 35.4×10^{-12} F/m
   (c) 66.4×10^{-12} F/m
   (d) 17.7×10^{-12} F/m
9. 8.85 pF
11. 增加 12.5 pF
13. 陶瓷的
15. 铝,钽;它们是极化的。
17. (a) 0.022 μF (b) 0.47 μF
    (c) 0.001 μF (d) 220 pF
19. (a) 0.688 μF (b) 69.7 pF
    (c) 2.64 μF
21. 2 μF
23. (a) 1057 pF (b) 0.121 μF
25. (a) 2.62 μF (b) 689 pF
    (c) 1.6 μF
27. $\Delta V_5 = +1.39$ V, $\Delta V_6 = -2.96$ V
29. (a) 13.2 ms (b) 247.5 μs
    (c) 11 μs (d) 280 μs
31. (a) 9.20 V (b) 1.24 V
    (c) 0.458 V (d) 0.168 V
33. (a) 17.9 V (b) 12.8 V (c) 6.59 V
35. 7.62 μs
37. 3.00 μs
39. 参见图 P.17



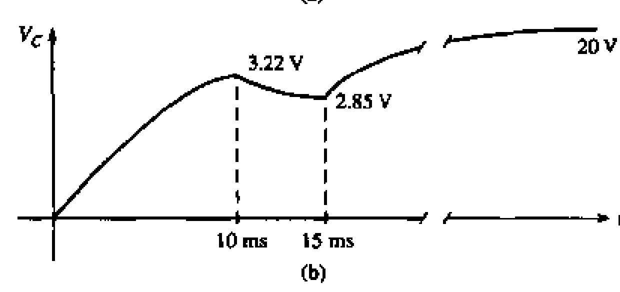


图 P.17

41. (a) 31.8 Ω (b) 111 kΩ
    (c) 49.7 Ω
43. 200 Ω
45. 0 W, 3.39 mVAR

47. 0.00541 μF
49. 理想情况下,旁路电容的容抗 X_C 应该为 0 Ω。
51. 电容被短路。

第 14 章

1. (a) 1000 mH (b) 0.25 mH (c) 0.01 mH (d) 0.5 mH
3. 50 mV
5. 20 mV
7. 1 A
9. 155 μH
11. 50.5 mH
13. 7.14 μH
15. (a) 4.33 H (b) 50 mH (c) 0.571 μH
17. (a) 1 μs (b) 2.13 μs (c) 2 μs
19. (a) 5.52 V (b) 2.03 V (c) 747 mV (d) 275 mV (e) 101 mV
21. (a) 12.3 V (b) 9.10 V (c) 3.35 V
23. 11.0 μs
25. 3.18 ms
27. 240 V
29. (a) 144 Ω (b) 10.1 Ω (c) 13.4 Ω
31. (a) 55.5 Hz (b) 796 Hz (c) 597 Hz
33. $26.1\angle -90°$ mA
35. (a) 电阻阻值无穷大
    (b) 电阻阻值为 0
    (c) 较低的 R_W

第 15 章

1. 1.5 μH
3. 4;0.25
5. (a) 100 V rms;同相
   (b) 100 V rms;异相
   (c) 20 V rms;异相
7. 600 V
9. 0.25(4:1)
11. 60 V
13. (a) 25 mA (b) 50 mA (c) 15 V (d) 750 mW
15. 1.83
17. 9.76 W
19. (a) 6 V (b) 0 V (c) 40 V
21. 94.5 W
23. 0.98
25. 25 kVA
27. $V_1 = 11.5$ V, $V_2 = 23.0$ V, $V_3 = 23.0$ V, $V_4 = 46.0$ V
29. (a) 48 V (b) 25 V
31. (a) $\boldsymbol{V}_{RL} = 35\angle 0°$ V, $\boldsymbol{I}_{RL} = 2.92\angle 0°$ A, $\boldsymbol{V}_C = 15\angle 0°$ V, $\boldsymbol{I}_C = 1.5\angle 90°$ A
    (b) $34.5\angle -12.5°$ Ω
33. 会产生过量的初级电流,除非在初级绕组处用保险丝加以保护,否则电源或变压器都有被烧毁的潜在危险。

第 16 章

1. 8 kHz,8 kHz
3. (a) 270 Ω − j100 Ω, $288\angle -20.3°$ Ω
   (b) 680 Ω − j1000 Ω, $1.21\angle -55.8°$ kΩ
5. (a) 56 kΩ − j723 kΩ
   (b) 56 kΩ − j145 kΩ
   (c) 56 kΩ − j72.3 kΩ
   (d) 56 kΩ − j28.9 kΩ
7. (a) $R = 33$ Ω, $X_C = 50$ Ω
   (b) $R = 272$ Ω, $X_C = 127$ Ω
   (c) $R = 698$ Ω, $X_C = 1.66$ kΩ
   (d) $R = 558$ Ω, $X_C = 558$ Ω
9. (a) $183\angle 57.5°$ μA
   (b) $611\angle 40.3°$ μA
   (c) $1.98\angle 76.2°$ mA
11. −14.5°
13. (a) $97.3\angle -54.9°$ Ω
    (b) $103\angle 54.9°$ mA
    (c) $5.76\angle 54.9°$ V
    (d) $8.18\angle -35.1°$ V
15. $R_X = 12$ Ω, $C_X = 13.3$ μF 两者串联
17. 245 Ω, −80.5°
19. $\boldsymbol{V}_C = \boldsymbol{V}_R = 10\angle 0°$ V　$\boldsymbol{I}_{tot} = 184\angle 37.1°$ mA
    $\boldsymbol{I}_R = 147\angle 0°$ mA　$\boldsymbol{I}_C = 111\angle 90°$ mA

21. (a) $6.59\angle -48.8^\circ\ \Omega$ (b) $10\angle 0^\circ$ mA
(c) $11.4\angle 90^\circ$ mA (d) $15.2\angle 48.8^\circ$ mA
(e) -48.8°(I_{tot}超前V_s)

23. 18.4 kΩ 电阻与 196 pF 电容串联

25. $V_{C1} = 8.42\angle -2.9^\circ$ V,
$V_{C2} = 1.58\angle -57.5^\circ$ V
$V_{C3} = 3.65\angle 6.8^\circ$ V, $V_{R1} = 3.29\angle 32.5^\circ$ V
$V_{R2} = 2.36\angle 6.8^\circ$ V, $V_{R3} = 1.29\angle 6.8^\circ$ V

27. $I_{tot} = 79.5\angle 87.1^\circ$ mA, I_{C2R1}
$= 6.99\angle 32.5^\circ$ mA,
$I_{C3} = 75.7\angle 96.8^\circ$ mA, I_{R2R3}
$= 7.16\angle 6.8^\circ$ mA

29. 0.103 μF

31. $I_{C1} = I_{R1} = 2.27\angle 74.5^\circ$ mA
$I_{R2} = 2.04\angle 72.0^\circ$ mA
$I_{R3} = 246\angle 84.3^\circ$ μA
$I_{R4} = 149\angle 41.2^\circ$ μA
$I_{R5} = 180\angle 75.1^\circ$ μA
$I_{R6} = I_{C3} = 101\angle 135^\circ$ μA
$I_{C2} = 101\angle 131^\circ$ μA

33. 4.03 VA

35. 0.914

37. (a) $I_{LA} = 4.8$ A, $I_{LB} = 3.33$ A
(b) $P_{rA} = 606$ VAR, $P_{rB} = 250$ VAR
(c) $P_{trueA} = 979$ W, $P_{trueB} = 759$ W
(d) $P_{aA} = 1151$ VA, $P_{aB} = 799$ VA
(e) 负载 A

39.

0 Hz	1 V
1 kHz	723 mV
2 kHz	464 mV
3 kHz	329 mV
4 kHz	253 mV
5 kHz	205 mV
6 kHz	172 mV
7 kHz	148 mV
8 kHz	130 mV
9 kHz	115 mV
10 kHz	104 mV

41.

0 Hz	0 V
1 kHz	5.32 V
2 kHz	7.82 V
3 kHz	8.83 V
4 kHz	9.29 V
5 kHz	9.53 V
6 kHz	9.66 V
7 kHz	9.76 V
8 kHz	9.80 V
9 kHz	9.84 V
10 kHz	9.87 V

43. 0.0796 μF

45. V_{out}减少到 2.83 V, θ 减小到 -56.7°

47. (a) 无输出电压
(b) $320\angle -71.3^\circ$ mV
(c) $500\angle 0^\circ$ mV
(d) 0 V

第 17 章

1. 15 kHz

3. (a) $100\ \Omega + j50\ \Omega$; $112\angle 26.6^\circ\ \Omega$
(b) $1.5\ k\Omega + j1\ k\Omega$; $1.80\angle 33.7^\circ$ kΩ

5. (a) $17.4\angle 46.4^\circ\ \Omega$ (b) $64.0\angle 79.2^\circ\ \Omega$
(c) $127\angle 84.6^\circ\ \Omega$ (d) $251\angle 87.3^\circ\ \Omega$

7. 806 Ω, 4.11 mH

9. (a) $43.5\angle -55^\circ$ mA
(b) $11.8\angle -34.6^\circ$ mA

11. θ 角从 38.7°上升到 58.1°

13. (a) $V_R = 4.85\angle -14.1^\circ$ V
$V_L = 1.22\angle 75.9^\circ$ V
(b) $V_R = 3.83\angle -40.0^\circ$ V
$V_L = 3.21\angle 50.0^\circ$ V
(c) $V_R = 2.16\angle -64.5^\circ$ V
$V_L = 4.51\angle 25.5^\circ$ V
(d) $V_R = 1.16\angle -76.6^\circ$ V
$V_L = 4.86\angle 13.4^\circ$ V

15. $7.75\angle 49.9^\circ\ \Omega$

17. 2.39 kHz

19. (a) $274\angle 60.7^\circ\ \Omega$

(b)89.3∠0° mA

(c)159∠−90° mA

(d)182∠−60.7° mA

(e)60.7°(I_{tot}滞后于V_s)

21. 1.83 kΩ 电阻与感抗为 4.21 kΩ 的电感串联

23. V_{R1} = 21.8∠−3.89° V

V_{R2} = 7.27∠9.61° V

V_{R3} = 3.38∠−53.3° V

V_{L1} = V_{L2} = 6.44∠37.3° V

25. I_{R1} = 389∠−3.89° mA

I_{R2} = 330∠9.61° mA

I_{R3} = 102∠−53.3° mA

I_{L1} = I_{L2} = 51.3∠−52.7° mA

27. (a)588∠−50.5° mA

(b)22.0∠16.1° V

(c)8.63∠−135° V

29. θ = 52.5°(V_{out}滞后V_{in}),0.143

31. 参见图 P.18

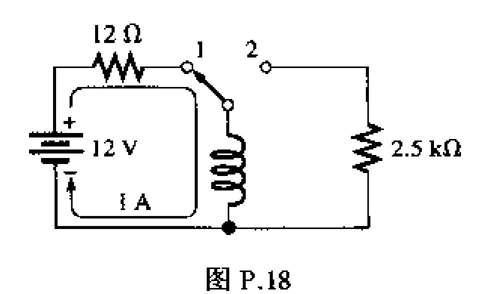


图 P.18

33. 1.29 W,1.04 VAR

35. P_{true} = 290 mW;P_r = 50.8 mVAR

P_a = 296 mVA;PF = 0.985

37. (a) −0.0923° (b) −9.15°

(c) −58.2° (d) −86.4°

39. (a)89.9° (b) 80.9°

(c) 31.8° (d) 3.60°

41. 参见图 P.19

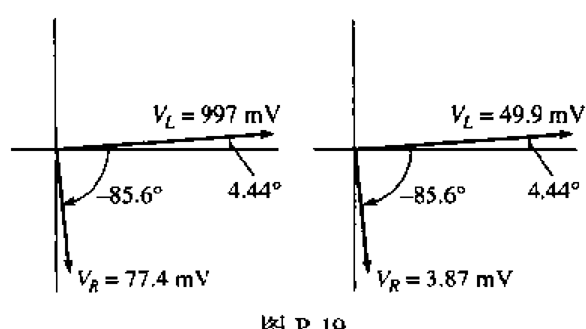


图 P.19

43. (a) 0 V (b) 0 V

(c) 1.62∠−25.8° V

(d) 2.15∠−64.5° V

第 18 章

1. 520∠−88.9° Ω;容抗为 520 Ω

3. 阻抗上升到 150 Ω

5. I_{tot} = 61.4∠−43.8° mA

V_R = 2.89∠−43.8° V

V_L = 4.91∠46.2° V

V_C = 2.15∠−134° V

7. (a) 35.8∠65.1° mA (b)181 mW

(c) 390 mVAR (d) 430 mVA

9. Z = 200 Ω, X_C = X_L = 2 kΩ

11. 500 mA

13. 参见图 P.20

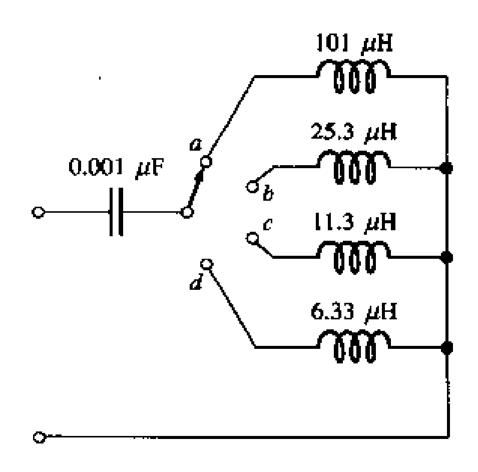


图 P.20

15. 相角为 −4.43°说明这是一个容性电路。

17. I_R = 50∠0° mA

I_L = 4.42∠−90° mA

I_C = 8.29∠90° mA

I_{tot} = 50.2∠4.43° mA

V_R = V_L = V_C = 5∠0° V

19. I_R = 50∠0° mA, I_L = 531∠−90° μA,

I_C = 69.1∠90° mA, I_{tot} = 84.9∠53.9° mA

21. 53.5 MΩ,104 kHz

23. P_r = 0 VAR, P_a = 7.45 μVA, P_{true} = 53.8 mW

25. (a) −1.97°(V_s 滞后 I_{tot})

(b)23.0°(V_s 超前 I_{tot})

27. 49.1 kΩ 电阻与 1.38 H 电感串联

29. 45.2°(I_2 超前 V_s)

31. $\mathbf{I}_{R1} = \mathbf{I}_{C1} = 1.09\angle -25.7°$ mA

$\mathbf{I}_{R2} = 767\angle 19.3°$ μA

$\mathbf{I}_{C2} = 767\angle 109.3°$ μA

$\mathbf{I}_{L} = 1.53\angle -70.7°$ mA

$\mathbf{V}_{R2} = \mathbf{V}_{C2} = \mathbf{V}_{L} = 7.67\angle 19.3°$ V

$\mathbf{V}_{R1} = 3.60\angle -25.7°$ V

$\mathbf{V}_{C1} = 1.09\angle -116°$ V

33. 52.2∠126° mA

35. $f_{r(串联)} = 4.11$ kHz

$\mathbf{V}_{out} = 4.83\angle -61.0°$ V

$f_{r(并联)} = 2.6$ kHz

$\mathbf{V}_{out} \cong 10\angle 0°$ V

37. 62.5 Hz

39. 1.38 W

41. 200 Hz

第 19 章

1. 2.22∠−77.2° V rms

3. (a) 9.36∠−20.7° V
   (b) 7.18∠−44.1° V
   (c) 9.96∠−5.44° V
   (d) 9.95∠−5.74° V

5. (a) 12.1 μF (b) 1.45 μF
   (c) 0.723 μF (d) 0.144 μF

9. (a) 7.13 V (b) 5.67 V
   (c) 4.01 V (d) 0.800 V

11. 9.75∠12.8° V

13. (a) 3.53∠69.3° V
    (b) 4.85∠61.0° V
    (c) 947∠84.6° mV
    (b) 995∠84.3° mV

17. (a) 14.5 kHz (b) 24.0 kHz

19. (a) 15.06 kHz, 13.94 kHz
    (b) 25.3 kHz, 22.7 kHz

21. (a) 117 V (b) 115 V

23. $C = 0.064$ μF, $L = 989$ μH, $f_r = 20$ kHz

25. (a) 86.3 Hz (b) 7.34 MHz

27. $L_1 = 0.08$ μH, $L_2 = 0.554$ μH

第 20 章

1. 1.22∠28.6° mA

3. 81.0∠−11.9° mA

5. $V_{A(dc)} = 0$ V, $V_{B(dc)} = 16.1$ V,
   $V_{C(dc)} = 15.1$ V, $V_{D(dc)} = 0$ V,
   $V_{A(peak)} = 9$ V, $V_{B(peak)} = 5.96$ V,
   $V_{C(peak)} = V_{D(peak)} = 4.96$ V

7. (a) $\mathbf{V}_{th} = 15\angle -53.1°$ V
   $\mathbf{Z}_{th} = 63\ \Omega - j48\Omega = 79.2\angle -37.3°\ \Omega$
   (b) $\mathbf{V}_{th} = 1.22\angle 0°$ V
   $\mathbf{Z}_{th} = j237\ \Omega = 237\angle 90°\ \Omega$
   (c) $\mathbf{V}_{th} = 12.1\angle 11.9°$ V
   $\mathbf{Z}_{th} = 50\ \text{k}\Omega - j20\ \text{k}\Omega = 59.9\angle 21.8°\ \text{k}\Omega$

9. 16.9∠88.2° V

11. (a) $\mathbf{I}_n = 189\angle -15.8°$ mA
    $\mathbf{Z}_n = 63\ \Omega - j48\ \Omega$
    (b) $\mathbf{I}_n = 5.15\angle -90°$ mA
    $\mathbf{Z}_n = j237\ \Omega$
    (c) $\mathbf{I}_n = 224\angle 33.7°$ μA
    $\mathbf{Z}_n = 50\ \text{k}\Omega - j20\ \text{k}\Omega$

13. 16.8∠88.5° V

15. 9.18 Ω + j2.90 Ω

17. 95.2 Ω + j42.7 Ω

第 21 章

1. 103 μs

3. 12.6 V

5. 参见图 P.21

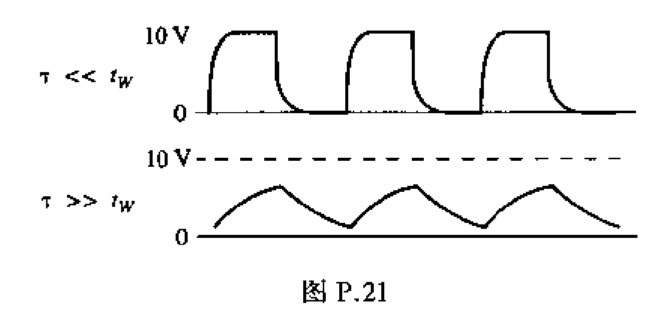


图 P.21

7. (a) 23.5 ms
   (b) 参见图 P.22

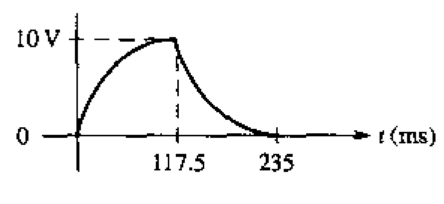


图 P.22

9. 参见图 P.23

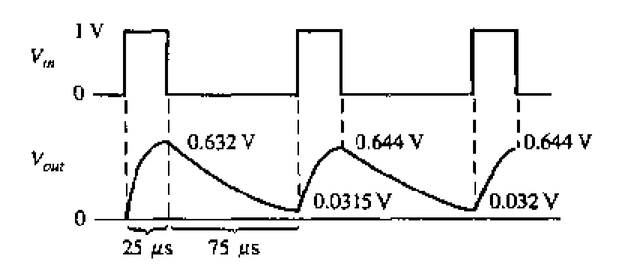


图 P.23

11. 参见图 P.24

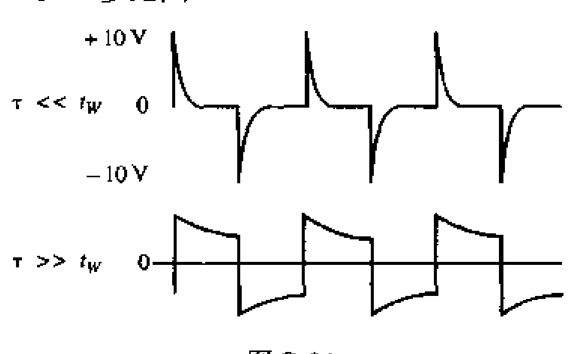


图 P.24

13. (a) 493.5 ns
(b) 参见图 P.25

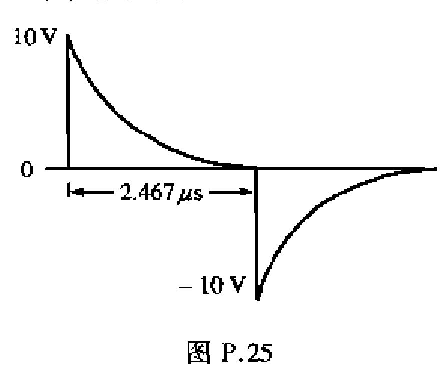


图 P.25

15. 一个平均值为 0 的近似矩形波

17. 参见图 P.26

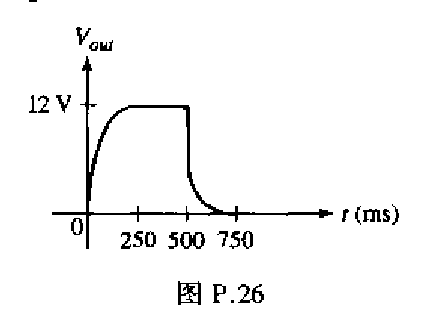


图 P.26

19. (a) 4.55 μs
(b) 参见图 P.27

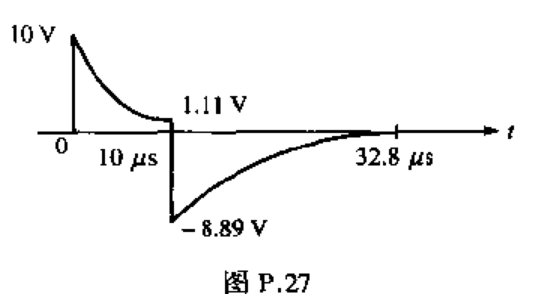


图 P.27

21. 15.9 kHz

23. (b) 电容开路或 R 短路
(c) C 漏电或 $R > 3.3$ kΩ 或 $C > 0.22$ μF
(d) 电阻开路或电容短路

第 22 章

1. 17.5°

3. $376\angle 41.3°$ mA

5. $1.32\angle 121°$ A

7. $\boldsymbol{I}_{La} = 8.66\angle -30°$ A
$\boldsymbol{I}_{Lb} = 8.66\angle 90°$ A
$\boldsymbol{I}_{Lc} = 8.66\angle -150°$ A

9. (a) $\boldsymbol{V}_{L(ab)} = 866\angle -30°$ V
$\boldsymbol{V}_{L(ca)} = 866\angle -150°$ V
$\boldsymbol{V}_{L(bc)} = 866\angle 90°$ V
(b) $\boldsymbol{I}_{\theta a} = 500\angle -32°$ mA
$\boldsymbol{I}_{\theta b} = 500\angle 88°$ mA
$\boldsymbol{I}_{\theta c} = 500\angle -152°$ mA
(c) $\boldsymbol{I}_{La} = 500\angle -32°$ mA
$\boldsymbol{I}_{Lb} = 500\angle 88°$ mA
$\boldsymbol{I}_{Lc} = 500\angle -152°$ mA
(d) $\boldsymbol{I}_{Za} = 500\angle -32°$ mA
$\boldsymbol{I}_{Zb} = 500\angle 88°$ mA
$\boldsymbol{I}_{Zc} = 500\angle -152°$ mA
(e) $\boldsymbol{V}_{Za} = 500\angle 0°$ V
$\boldsymbol{V}_{Zb} = 500\angle 120°$ V
$\boldsymbol{V}_{Zc} = 500\angle -120°$ V

11. (a) $\boldsymbol{V}_{L(ab)} = 86.6\angle -30°$ V
$\boldsymbol{V}_{L(ca)} = 86.6\angle -150°$ V
$\boldsymbol{V}_{L(bc)} = 86.6\angle 90°$ V
(b) $\boldsymbol{I}_{\theta a} = 250\angle 110°$ mA
$\boldsymbol{I}_{\theta b} = 250\angle -130°$ mA

$\boldsymbol{I}_{\theta c} = 250\angle -10°$ mA

(c) $\boldsymbol{I}_{La} = 250\angle 110°$ mA

$\boldsymbol{I}_{Lb} = 250\angle -130°$ mA

$\boldsymbol{I}_{Lc} = 250\angle -10°$ mA

(d) $\boldsymbol{I}_{Za} = 144\angle 140°$ mA

$\boldsymbol{I}_{Zb} = 144\angle 20°$ mA

$\boldsymbol{I}_{Zc} = 144\angle -100°$ mA

(e) $\boldsymbol{V}_{Za} = 86.6\angle -150°$ V

$\boldsymbol{V}_{Zb} = 86.6\angle 90°$ V

$\boldsymbol{V}_{Zc} = 86.6\angle -30°$ V

13. $\boldsymbol{V}_{L(ab)} = 300\angle -120°$ V

$\boldsymbol{V}_{L(ca)} = 330\angle 120°$ V

$\boldsymbol{V}_{L(bc)} = 330\angle 0°$ V

$\boldsymbol{I}_{Za} = 38.2\angle -150°$ A

$\boldsymbol{I}_{Zb} = 38.2\angle -30°$ A

$\boldsymbol{I}_{Zc} = 38.2\angle 90°$ A

15. 图 22.41:636 W　　图 22.42:149 W

图 22.43:12.8 W　　图 22.44:2.78 kW

图 22.45:10.9 kW

17. 24.2 W

术 语 表

admittance(Y):导纳(Y) 是电抗电路允许电流通过的能力的量度,是阻抗的倒数。单位是西门子(S)。
alternating current (ac):交流电流(ac) 信号源电压的极性改变,电流方向也发生翻转。
alternator:交流发电机 一种将机械能转换为交流电能的设备。
ammeter:安培表 一种测量电流的电测仪器。
ampere(A):安培(A) 电流的单位。
ampere-hour rating:安培-小时额定值 安培-小时额定值由电池提供给负载的电流与其所持续时间长度的乘积来决定。
ampere-turn:安培匝数(At) 磁通势(mmf)的单位。
amplitude:幅度 交流电压或电流的最大值。
angular velocity:角速度 和用相量表示的正弦波频率有关的相量的旋转速度。
apparent power:视在功率(Pa) 是电阻功率(有功功率)与电抗功率(无功功率)的相量和。单位是伏-安(VA)。
apparent power rating:额定视在功率 用伏安表示变压器额定功率的方法。
atom:原子 一个元素中保留该元素特性的最小粒子。
atomic number:原子序数 原子核中质子的数量。
attenuation:衰减 指输出信号比输入信号减少的部分,输出电压/输入电压的值小于1。
autotransformer:自耦变压器 初级和次级公用一个单一绕组的变压器。
average value:平均值 正弦波的平均值指半个周期内的平均值,是峰值的0.637倍。
AWG(American wire gauge):AWG(美国导线规格) 一种基于导线直径的统一标准。
balanced bridge:平衡电桥 输出是0 V的平衡状态的电桥电路。
balanced load:平衡负载 各相负载电流相等且中线电流为0的情况。
band-pass filter:带通滤波器 可以使两个临界频率间的信号通过,而拒绝此频率范围外信号通过的滤波器。
band-stop filter:带阻滤波器 拒绝两个临界频率间的信号通过,而使此频率范围外信号通过的滤波器。
bandwidth:带宽 电流(或输出电压)值等于或大于70.7%的谐振频率所对应的电流(电压)值包含的频率范围叫作为通过滤波器的频率范围。
baseline:基线 脉冲波形的基准线,即无脉冲时的电压水平线。
battery:电池组 通过化学反应将化学能转化为电能的能源。
bias:偏置 通过在电子器件上应用直流电压来完成一定的操作。
bleeder current:分压器电流 电路中的总电流减去总的负载电流剩下的电流。
Bode plot:波特图 输入电压幅值一定时,表示以分贝为单位的输出电压/输入电压随频率变化的曲线。
branch:支路 并联电路中的一个电流通路;连接两节点的电流路径。
branch current:支路电流 一条支路中的电流。
capacitance:电容 表示电容储存电荷的能力。
capacitive reactance:容抗 电容对正弦电流的阻碍能力的量度,单位是欧姆。
capacitive susceptance(B_C):电容电纳(B_C) 电容允许电流通过的能力;是电容电抗的倒数。单位是西门子(S)。
capacitor:电容器 是一种由绝缘材料分隔的两块导电金属板所组成,具有存储电能性质的电器件。
center frequency(f_0):中心频率(f_0) 带通或带阻滤波器的谐振频率。
center tap(CT):中心抽头 在变压器线圈中点的引出线。
charge:电荷 物质由于带有过量电子或缺少电子所具有的电特性。电荷可正可负。

choke:扼流器 一种用于阻挡高频的电感。

circuit:电路 电气元件为产生一定的结果而相互连接称为电路。一个基本电路由一个电源、一个负载和电流的流通路径所组成。

circuit breaker:断路器 一种可设置的电路保护器件,主要用于阻断电路以防产生过量电流。

circuit ground:电路接地 一种接地方法,通过金属底座可以提供印刷电路板上的组件或很大的可导面积,用于公共点或参考点;也称底座接地。

circular mil(CM):圆密耳(CM) 导线横截面积的单位。

closed circuit:闭合回路 具有一个完整的电流流通路径的电路。

coefficient:系数 一种放在变量前面的常数。

coefficient of coupling(k):耦合系数(k) 变压器的次级磁通量与初级磁通量之比。理想值为1,说明所有初级线圈的磁通量都耦合到次级线圈。

complex conjugate:复共轭 具有与给定阻抗电阻分量相同、电抗分量相位相反的阻抗,二者在幅值上相同。

complex plane:复平面 可以在其上面表示既包含大小,又包含方向的量,并由四个象限组成的区域。

conductance(G):电导(G) 一个电路中允许电流通过的能力。单位是西门子(S)。

conductor:导体 一种电流可以通过的物质,例如铜。

core:磁心 电感中导线所缠绕的物理结构,磁心的材料影响电感的电磁特性。

coulomb(C):库仑(C) 电荷的单位。

coulomb's law:库仑定律 为物理定律,说明两个带电体之间的引力与其带电量成正比,与其之间的距离成反比。

critical frequency(f_c):临界频率(f_c) 滤波器的输出等于最大输出值的70.7%时对应的频率。

current:电流 电荷(电子)移动的快慢。

current divider:分流器 每个并联分支中的电流值和分支中的电阻阻值成反比的并联电路。

current source:电流源 一个无论负载电阻为多大都能理想地提供常量电流的设备。

cutoff frequency(f_c):截止频率(f_c) 滤波器输出电压为其最大输出电压的70.7%时的频率,临界频率的另一种说法。

cycle:循环 周期性波形的一次重复。

DC component:直流分量 脉冲波形的平均值。

DC power supply:直流电源 是一种由交流电力线或电池通过适当方式提供功率,用来产生电压和电流的电子仪器。

decade:十倍频程 指频率或其他参数的十倍变化。

decibel:分贝 两个功率比或两个电压比的对数,通常表示滤波器的输入/输出关系。

degree:度 对应于一个完整周期的1/360的角度测量单位。

determinant:行列式 给定一组联立方程的系数和常数的阵列。

dielectric:电介质 电容两个极板之间的绝缘物质。

dielectric constant:介电常数 针对绝缘材料建立电场能力大小的一种量度。

dielectric strength:介电强度 针对绝缘材料不被击穿的耐压能力的一种量度。

differentiator:微分器 产生的输出是输入的数学微分的电路。

digital multimeter:数字万用表(DMM) 是一种测量电压、电流和电阻的电子工具。

duty cycle:占空因截 脉冲波形的一个特性,用来表示在一个周期内脉冲所占时间的百分数,脉冲宽度对时间的比率表示为分数或者百分数。

effective value:有效值 正弦波形热效应的量度,也相当于rms(均方根)值。

efficiency:效率 电路中输出功率与输入功率的比值,用百分比表示。

electrical:电气 为达到预期效果的有关电压和电流的使用。

electrical isolation:电隔离 两个线圈间只存在磁连接而没有电连接的情况。

electrical shock:电击 电流通过身体所产生的感觉。

electromagnetic field:电磁场 导体中电流产生的,围绕导体的一组磁力线这样一种构造。

electromagnetic induction:电磁感应 当导体和磁场或者电磁场之间有相对运动时,导体上产生感应电压的现象或者过程。

electron:电子 物质中带电的基本粒子,电子带负电荷。

electronic:电传导 关于自由电子在半导体或真空装置中的移动和控制。

element:元素 构成宇宙的特殊物质,每个元素都代表一种单一的原子结构。

energy:能量 做功的能力。

engineering notation:工程计数法 是一种用一、二或三个阿拉伯数字和 10 的幂的乘积来表示数值的方法,且 10 的幂指数必须是 3 的倍数。

equivalent circuit:等效电路 对于给定负载,可以提供与原电路有相同电压和电流的电路。

exponent:指数 以一个基数进行自乘的个数。

falling edge:下降沿 脉冲的负向跳变。

fall time(t_f):下降时间(t_f) 脉冲从幅度的 90% 下降到幅度的 10% 所需要的时间间隔。

farad(F):法[拉](f) 电容的单位。

Faraday's law:法拉第定律 导线圈上的感应电压等于线圈匝数倍的磁通量变化率。

field winding:励磁绕组 交流发电机中转子上的绕组。

filter:滤波器 一种允许某些频率成分通过,而阻止其他频率成分通过的电路。

free electron:自由电子 一个价电子脱离原来所在原子的束缚而在物质的原子结构中的原子间自由移动。

frequency:频率(f) 计量周期函数的变化率;1 s 内完成周期的数目,频率的单位是赫兹。

frequency response:频率响应 在电子电路中,输出电压(或电流)在特定频率范围的变化过程。

function generator:函数发生器 能够产生正弦波、三角波和脉冲等电信号的电子仪器。

fundamental frequency:基波频率 波形的重复率。

fuse:保险丝 当电路中的电流过大时会自动熔断的一种电路保护器件。

gauss:高斯 通量密度的厘米 - 克 - 秒制单位。

generator:发电机 一种能够产生电信号的能源。

ground:接地 电路中常用的参考点。

half-power frequency:半功率点 使滤波器输出功率等于最大输出功率值的 50% (输出电压等于最大输出电压的 70.7%)时对应的频率,又叫做临界频率或拐点频率。

half-splitting:半分法 以电路或系统的中央作为起点,逐渐向输入或输出逼近最终找出故障的一种故障检修方法

harmonics:谐波 复合波形所包含的各个频率分量,它的频率是脉冲重复频率(基波频率)的整数倍。

henry(H):亨利(H) 电感的单位。

hertz(Hz):赫兹(Hz) 频率的单位,1 赫兹等于 1 周期每秒。

high-pass filter:高通滤波器 是指允许高于临界频率的信号通过,而拒绝低于临界频率的信号通过的滤波器。

hysteresis:磁滞 磁性物质的一种特性,指磁化强度的变化滞后于磁场力的作用。

imaginary number:虚数 存在于复平面垂直轴上的数。

impedance:阻抗 用欧姆表示的对于正弦电流的总的反抗能力。

impedance matching:阻抗匹配 使负载电阻与电源内阻匹配,以获得最大功率传输的一种技术。

induced current(i_{ind}):感应电流(i_{ind}) 当导体运动穿过磁场时,导体上感应产生的电流。

induced voltage(v_{ind}):感应电压(v_{ind}) 磁场中的电流变化所产生的电压。

inductance:电感 电感元件中电流变化产生感应电压阻碍电流变化的能力。

inductive reactance:感抗 电感阻碍正弦电流的能力,单位为 Ω。

inductive susceptance:电感电纳(B_L) 感抗的倒数。单位是西门子(S)。

inductor:电感元件 心体外绕上导线所制成能够产生感应电压的电子元件,也称为线圈。

instantaneous power:瞬时能量 任何给定时间电容的能量。

instantaneous value:瞬时值 在给定的时间瞬时,波形的电压值或电流值。

insulator:绝缘体 一种在常规环境下不允许电流通过的物质。

integrator:积分器 产生的输出是输入的数学积分的电路。

ionization:电离 一个中性原子上增加或减少一个电子,从而形成具有净正电荷或净负电荷的离子。

joule(J):焦耳(J) 能量的单位。

juction:结点 两个或两个以上的部分连接的点。

kilowatt-hour(kWh):千瓦-小时(kWh) 一种在电力系统中常用的能量单位。

Kirchhoff's current law:基尔霍夫电流定律 流进一个结点的总电流等于流出该结点的总电流。

Kirchhoff's voltage law:基尔霍夫电压定律 定律表述为:(1)单一闭合回路的电路中,电压降的总和等于这个回路中电源的总电压;(2)一个闭合回路内,所有电压(包括电源和电压降)的代数和为零。

lag:滞后 说明一个波形在相位或时间上落后于另一个波形的情况。

lead:超前(导线) 说明一个波形在相位或时间上领先于另一个波形的情况;也是连接仪器和器件的线。

leading edge:前沿 脉冲跃变的上升沿。

Lenz's law:楞次定律 流过线圈的电流发生改变时,磁场变化产生的感应电压的极性通常抵制电流引起的变化,使电流不能瞬时改变。

linear:线性 相互关系成直线关系的特性。

line current:线电流(I_L) 连接负载的边线上的电流。

lines of force:磁力线 磁场中从北极到南极辐射的磁通线。

line voltage:线电压(V_L) 连接负载的边线间的电压。

load:负载 一个元件(电阻或其他成分)连入电路的输出端,使电路中的电流分流;电路中消耗能量的器件。

loop:回路 电路中的闭合电流路径。

low-pass filter:低通滤波器 是指允许低于临界频率的信号通过,而拒绝高于临界频率的信号通过的滤波器。

magnetic coupling:磁耦合 两个线圈间的磁性吸引,结果使一个线圈中变化的磁力线切割另一个线圈。

magnetic field:磁场 从磁铁的北极到南极辐射的力线。

magnetic flux:磁通量 永磁铁或者电磁铁的北极和南极之间的力线。

magnetic flux density:磁通密度 与磁场正交的单位面积所通过的磁通量。

magnetizing force:磁场强度 单位长度的磁性材料所含有的磁通势的数量。

magnetomotive force(mmf):磁通势(mmf) 产生磁场的力。

magnitude:模 矢量的大小,例如电压的伏特值和电流的安培值。

maximum power transfer:最大功率传递 当负载电阻等于源内阻时,电源对负载的最大功率传递。

mtric prefix:国际单位词头 在工程计数法中用来表示10的幂的符号。

multimeter:万用表 一种测量电压、电流和电阻的仪器。

mutual inductance:互感 两个分立线圈之间的感应,如变压器。

neutron:中子 原子中不带电荷的粒子。

node:节点 两个或两个以上的支路的连接点。

Norton's theorem:诺顿定理 一种将双端口线性电路化简为由电流源和等效阻抗并联构成的等效电路的方法。

nucleus:原子核 原子的中心部分,由中子和质子组成。

Ohm(Ω):欧姆(Ω) 电阻的单位。

Ohmmeter:欧姆表 一种测量电阻的仪器。

Ohm's law:欧姆定律 阐述了电流与电压成正比,而与电阻成反比的定律。

open:开路 电流通路断开的电路状态。

open circuit:开路 没有完整的电流流通路径的电路。

oscillator:振荡器 产生随时间变化信号的电子电路,不需要外部输入信号,而采用正反馈的方法。

oscilloscope:示波器 在屏幕上显示信号波形的一种测量仪器。

parallel:并联 电子电路中的一种关系,表示在两个相同的独立点上,连接两个或两个以上的电流通路。

parallel resonance:并联谐振 在并联 *RLC* 电路中,电抗相互抵消,阻抗最大的情况。

passband:通带 指能够通过滤波器的信号的频率范围。

peak-to-peak value:峰-峰值 波形上计量从最小值点到最大值点的电压值或电流值。

peak value:峰值 电压或电流波形正向最大值或负向最大值。

period(T):周期(T) 周期性波形完成一个完整循环所需要的时间间隔。

periodic:周期性 在固定时间间隔内重复的性质。

permeability:磁导率 磁场在物质中建立的难易程度的衡量。

phase:相位 表示随时间变化的量与参照物之间的相对角位移。

phase current(I_θ):相电流(I_θ) 通过发电机绕组的电流。

phase voltage(V_θ):相电压(V_θ) 加在发电机绕组两端的电压。

phaser:相量 正弦波的一种表示方法,由大小(振幅)和方向(相角)组成。

photoconductive cell:光敏电阻 一种光感应的可变电阻器。

polar form:极坐标形式 由大小和角度组成的一种复数形式。

polyphase:多相 表示有两个或两个以上的正弦电压,且彼此的相角不同。

potentiometer:电位器 一个三端可变电阻。

power:功率 能量的使用率。

power factor:功率因数 表示功率伏安与有功功率或瓦特之间的相互关系。伏安乘以功率因数等于有功功率。

power of ten:10 的幂 是由一个基数 10 和一个指数幂所构成的一种数字表示方法,是以 10 为基数按幂自乘。

power rating:额定功率 有热量集结而不使电阻损坏的最大功率。

primary winding:初级绕组 变压器的输入线圈,也叫初级。

proton:质子 带有正电荷的原子粒子。

pulse:脉冲 在时间域中,由两个大小相等,方向相反的梯形组成的电压或电流。

pulse repetition frequency:脉冲重复频率 重复脉冲的基本频率;脉冲重复的频率,可以用赫兹或每秒脉冲数表示。

pulse response:脉冲响应 在电子电路中,给定输入脉冲对电路的作用。

pulse width(t_W):脉冲宽度(t_w) 对于理想脉冲两个方向相反梯形之间的时间间隔;对非理想脉冲,指前沿上幅度 50% 的点和后沿上幅度 50% 的点之间的时间间隔。

quality factor:品质因数(Q) 谐振电路中有功功率和无功功率的比或电感的感抗与绕组电阻的比。

radian:弧度 角度的测量单位。一个完整的 360°圆周有 2π 弧度,1 弧度等于 57.3°。

ramp:斜坡 用来表示波形的一种特性,指电压或电流线性增加或线性减小。

***RC* time constant:*RC* 时间常数** 由 *R* 和 *C* 决定的一个固定时间值,决定了串联 *RC* 回路的时域响应。等于电阻和电容的积。

reactive power:无功功率 电容存储和释放能量的速率,单位是 VAR。

real number:实数 存在于复平面水平轴上的数。

rectangular form:直角坐标形式 由实部和虚部组成的一种复数形式。

rectifier:整流器 电子电路中将交流转换为直流的器件,电源的一部分。

reflected load:反映负载 相对于变压器初级所加的电源来说可看成一个负载。

reflected resistance:反映电阻 次级回路中的电阻折算到初级回路中所得的电阻。

relay:继电器 一种由起磁电流控制电子接点开或者关的电磁控制机械装置。

reluctance:磁阻 物质中磁场建立的阻碍。

resistance:阻抗 阻碍电流。单位为欧姆(Ω)。

resistor:电阻器 专门设计的一种具有一定阻值的电元件。

resonance:谐振 串联 *RLC* 电路中容抗和感抗大小相等时,彼此抵消形成纯电阻的情况。

resonant frequency:谐振频率 谐振情况发生时对应的频率,也叫中心频率。

retentivity:剩磁 物质一旦磁化,在不存在磁场强度以后保持磁化状态的能力。

rheostat:变阻器 一个两端可变电阻。

ripple voltage:波动电压 由于电容充电和放电引起的滤波整流直流电压的波动。

rise time:(t_r)上升时间(t_r) 脉冲从幅度的 10% 上升到幅度的 90% 所需要的时间间隔。

rising edge:上升沿 脉冲的正向跳变。

***RL* time constant:*RL* 时间常数** 由 *L* 和 *R* 决定的固定的时间间隔,决定电路的时域响应。

roll-off:拐点 滤波器频率响应曲线下降的速率。

rms value:均方根值 表明正弦电压热效应的值,同时也指正弦电压的有效值。等于 0.707 倍的峰值,rms 代表均方根。

rotor:转子 发电机或电动机中的旋转组件。

sawtooth waveform:锯齿波 一种由斜坡组成的波形;一种特殊情况的三角波,组成它的两个斜坡,一个斜坡比另一个的持续时间短得多。

schematic:原理图 一种在电路或电子电路中用符号表示的图表。

scientific notation:科学计数法 是用一个从 1 到 10 中的任意数字和 10 的幂的乘积来表示数值的一种方法。

secondary winding:次级绕组 变压器的输出绕组,也叫次级。

selectivity:选择性 是对一个滤波器如何有效地使某些频率的信号能够通过而拒绝其他频率信号的一种量度。一般情况下,带宽越窄,选择性越强。

semiconductor:半导体 一种导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。例如硅和锗。

series:串联 电路中,两点之间各元件的连接构成单一电流通路的元件关系。

series resonance:串联谐振 串联 *RLC* 电路中,电抗相互抵消,阻抗最小的情况。

shell:电子层 电子旋转的轨道。

short:短路 两点之间是零或异常低的阻抗通路的电路状态,通常是可以忽略的情况。

siemens(S):西门子(S) 电导的单位。

sine wave:正弦波 一种波形,遵循由公式 $y = A\sin\theta$ 定义的周期性正弦模式。

solenoid:螺线管 一种由起磁电流控制轴或者活塞机械运动的电磁控制装置。

source:电源 一种产生电能的仪器。

speaker:扬声器 一种把电信号转化为声波的电磁装置。

squirrel-cage:鼠笼电动机 一种交流感应电动机。

stator:定子 发电机或电动机的外部固定部分。

steady state:稳定状态 最初的暂态时间之后,电路的平衡状态。

step-down transformer:降压变压器 一种次级电压小于初级电压的变压器。

step-up transformer:升压变压器 一种次级电压大于初级电压的变压器

superposition theorem:叠加定理 分析具有一个以上电源电路的方法。

switch:开关 一种用来断开或闭合电流流通路径的电器件。

tank circuit:振荡电路 指并联谐振电路。

tapered:抽头 例如抽头式分压器。

temperature coefficient:温度系数 利用一个常数来说明随着温度的固定变化,所对应的变量数值的变化。

terminal equivalency:端口等效 任何给定电阻连在两个电源上,两个电源将提供相同负载电压和负载电流为端口等效。

tesla(T):特斯拉(T) 磁通密度的国际制单位。

thermistor:热敏电阻 一种温度感应的可变电阻器。

Thevenin's theorem:戴维南定理 一种将双端口线性电路化简为由电压源和等效阻抗串联构成的等效电路的方法。

time constant:时间常数 由电阻 R 和电容 C,或者由电阻 R 和电感 L 的值构成的固定时间的间隔,决定了电路响应的时间。

tolerance:误差 元件数值所能够变化的上下限。

trailing edge:后沿 脉冲跃变的下降沿。

transformer:变压器 由两个或更多个相互磁耦合的线圈形成的装置,并能使功率从一个线圈传输到另一个线圈。

transient time:暂态时间 大约等于五倍时间常数的间隔。

triangular waveform:三角波 一种由两个坡面组成的电路波形。

trigger:触发 一种应用于电子器件或仪器中的启动信号。

trimmer:微调电容器 一种可变电容。

troubleshooting:故障检修 一种隔离、识别和解决电路或系统故障的系统分析方法。

true power:有功功率 电路中损耗的能量,通常是热能。

turns ratio(n):匝数比(n) 次级绕组匝数与初级绕组匝数的比值。

unbalanced bridge:不平衡电桥 输出电压与对称状态时的偏差成比例的不平衡状态的桥电路。

valance:价 与原子的外层电子层或轨道有关。

valence electron:价电子 出现在原子最外层电子层中的电子。

VAR(volt-ampere reactive):VAR(伏安关系) 无功功率的单位。

volt:伏特 电压或电动势的单位。

voltage:电压 电子从电路中一点移动到另一点所消耗的能量总数。

voltage divider:分压器 由串联电阻构成,可得到一个或多个电压输出的电路。

voltage drop:压降 通过电阻前后能级的降低。

voltage source:电压源 一个无论负载电阻为多大都能理想地提供常量电压的设备。

voltmeter:伏特表 一种测量电压的仪器。

Watt(W):瓦特(W) 功率的单位。

Watt's law:瓦特定律 一个用来说明功率与电流、电压和电阻间相互关系的定律。

waveform:波形 显示电压或电流量怎样随时间变化的变化的图形。

weber:韦伯(Wb) 磁通量的国际单位制单位。

Wheatstone bridge:惠斯通电桥 利用平衡状态可以精确测量未知电阻的四脚类型的桥电路。电阻的偏差可用不平衡状态测量。

winding:绕组 电感元件中导线的圈数或匝数。

wiper:电刷 分压器中的滑动触点。